BLUE BACKS

ハイテク機はなぜ落ちるか

コンピュータ化が引き起こす新たな航空機事故

遠藤 浩





えんどう・ひろし……一九三〇年福島県生まれ。理学博士。太平洋戦争中に動員された飛行機工場で終戦を迎える。東北大学卒業後、中央気象台に勤務。航空機研究再開後、航空技術研究所に移り、風洞建設、国産機開発支援研究に従事する。ロンドン大学航空学科に留学し、SSTコンコルド、VTOLハリヤーの開発を見聞する。帰国後、国産機T4、および国際共同開発のB767の開発に協力。副所長として、スペースプレーンの基礎研究を推進する。退官後、航空輸送をトータルシステムの観点から研究している。

ハイテク機はなぜ落ちるか

コンピュータ化が引き起こす新たな航空機事故

遠藤　浩　著

ブルーバックス

カバー装幀／芦澤泰偉
カバーイラスト／富田勉
本文イラスト・図版／奈和浩子・アドバルーン
目次・扉デザイン／中山康子

はじめに

定期航空機の死亡事故は最近では世界全体で年間十数件、死亡者数五〇〇～六〇〇人で、率にすると、一〇〇万機離陸したうちの一～二機が死亡事故を起こす程度である。事故率は発生する地域によって違いがあるが、この世界平均の事故率を機械的に羽田を飛び立つ定期航空機に当てはめてみると、羽田空港からは年間六万～七万機が出発するから、十数年間に一機程度が死亡事故を起こす計算になり、ほぼ実際に近い。

では、空の旅の安全性を他の交通機関と比べると、どうであろうか。一九九二年、英国の王立講演協会でエドモンド・ハムリという人が代表的な人間活動の危険率を発表した。それによると、一億時間当りの死亡事故件数は表0―1のようになる。

つまり、空の旅は車の旅より一・三三倍危険とい

活　　動	1億時間当りの死亡事故件数
岩登り(岩壁にいる間)	4,000
ヘリコプタ	500
ロンドン空襲下の市民(1940年)	200
喫煙	40
空の旅	40
車の旅	30
列車の旅	5
家庭での事故	1

表0-1　人間のいろいろな活動の危険度(エドモンド・ハムリ，1992年)

うことである。これは、一時間二〇分かけて埼玉県の大宮から羽田まで車で行くのと、そこから一時間かけて大阪まで飛行機で行くのとで、事故に遭う確率がほぼ同じであることを意味する。飛行機が危ないという人は、車にも乗らないほうがよいだろう。

しかし、交通機関の安全性をこのような時間当りで比較するのは適当ではない。スピードは航空が提供する最も重要な商品である。この航空交通の本質から考えて、危険率は同一距離で比べなければ意味がない。そうすると、速度の優位が現れて、空のほうが車より約一〇倍安全なことになる。世界で最も航空機事故率の低い米国では、空の旅の安全性はハイウェイを車で旅するより三〇倍高いといわれている。

このように航空交通の事故率が低いので、一部の例外的な場合を除いて、利用者は安全なエアラインを選ぶというよりも、旅行スケジュールに合わせ、または運賃によって、乗る便を選んでいるのが実状であろう。

では定期航空は、この高い安全性をどのようにして達成したのだろうか。細かい検討をする前に、安全性の尺度として全損事故率を採用し、その年次変化（図0―1）を見てみよう。全損事故とは、修理が経済的に割に合わないほどひどい損傷をこうむったものをいい、一〇〇万回出発したときの全損事故の件数を全損事故率という。この図には、また、各機種ごとの就航時期を世代によってグループ分けして記入した。世代は四つに分けたが、第三と第四世代がコンピュータ

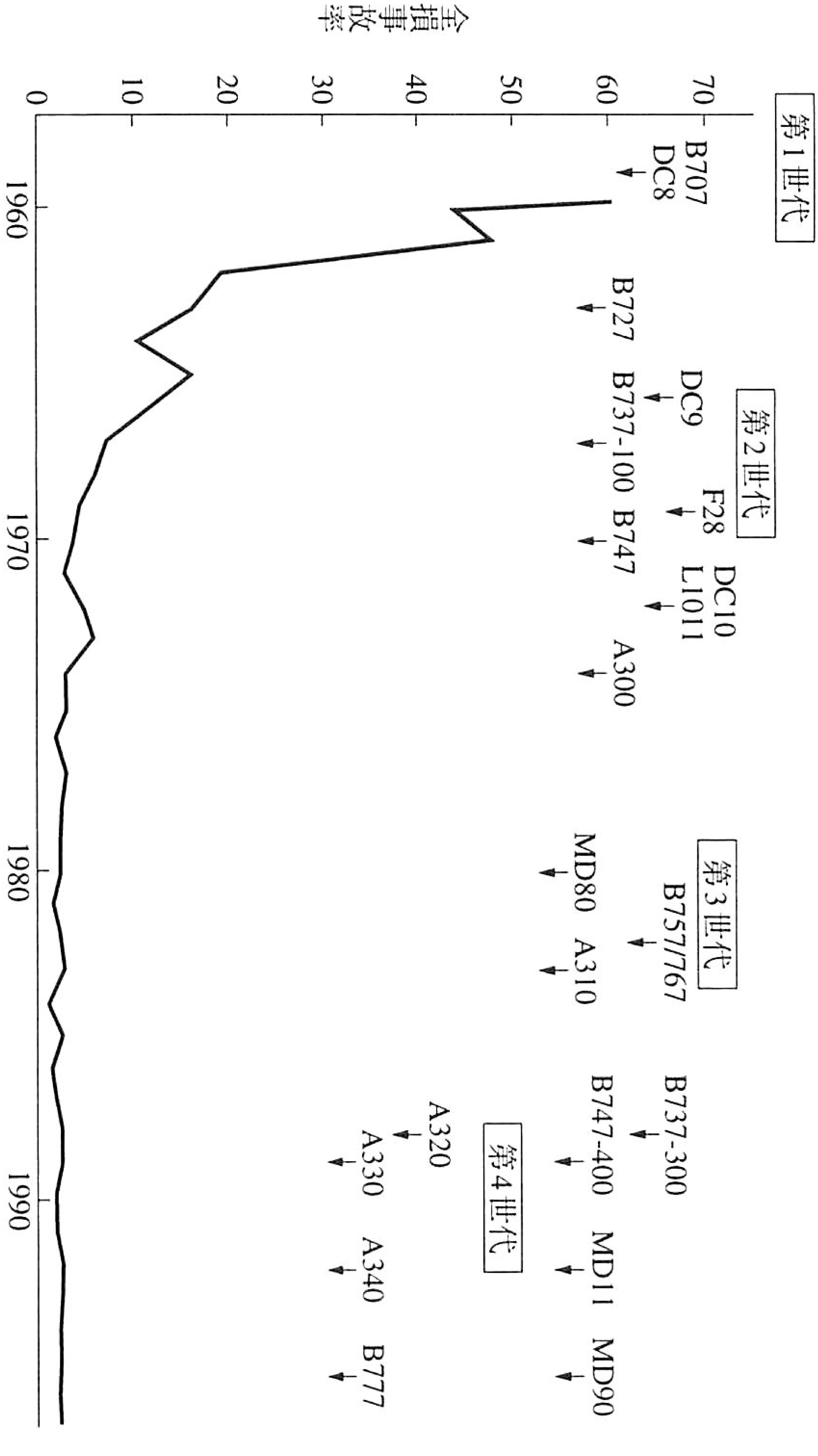


図 0-1　世界の商用ジェット旅客機の全損事故率（100 万回出発当たりの発生件数）
引用文献リスト(1)

技術を使った、いわゆるハイテク機である。

これを見ると、ジェット化の初期の一九五〇年代末から一九六〇年代にかけて全損事故率が急速に減少し、一九六〇年代後半から第二世代ジェット機が就航したあと、全損事故率は今日の低い水準に達したことがわかる。そのあと一九八〇年代に入って、第三世代と第四世代のジェット機が次々と就航したが、全損事故率はほとんど減少してはいない。このことから、全損事故率の減少はジェット化の初期の運用技術の成熟にともなって起こったという印象を受ける。

これに対し、自動化が進んだ第三、第四世代のジェット機の導入が安全上効果があったかどうかは、この図からだけではわからない。なぜなら、この図はその年代に運用されていた新旧すべてのジェット機をひっくるめた統計を示しているからである。

そこで、今度は世代別のジェット機の全損事故率を比べてみる。図0―2はエアバスインダストリが一九九七年五月に主催した第五回飛行安全会議の資料から引用したものである。この図の第三世代のなかには、なぜかB747―400が抜けているが、後で出る図0―3から分かるように、B747―400は出発回数も事故件数も少ないから、これを含めても結果にはほとんど変わりはない。図0―2は世代グループごとに各年度の全損事故率の平均をとり、就航年次以降の運用年数に対してプロットしてある。各カーブの最終年次は一九九六年である。したがって、各カーブは運用経験に伴う全損事故率の低下を示す、いわゆる「学習曲線」である。

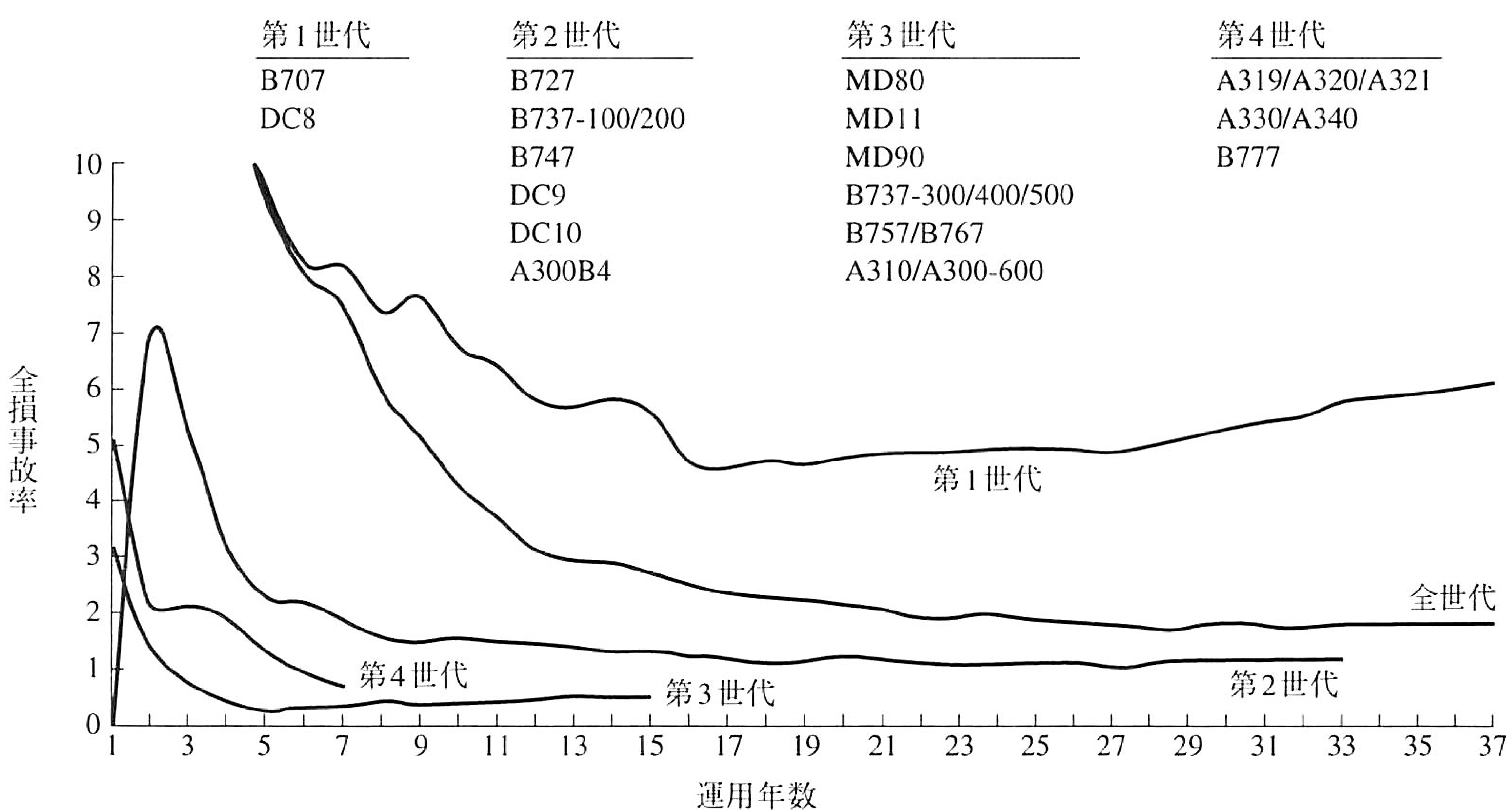


図 0-2　ジェット旅客機の世代別全損事故率（100 万回出発当たりの発生件数／アプセムのA 320 を除く）
引用文献リスト(2)

この図を見ると、第四世代の導入初期の全損事故率はかなり高い。これは安全性向上をうたい文句に登場したハイテク機にしては、意外である。そのうえ、運用に入ってから七年も経っているのに、全損事故率のカーブがまだ下がりきっておらず、いまだに第三世代より悪く、旧型の第二世代と比べても、それほどよいとはいえない。下がり方が第三世代より遅く、しかも単調に下がっていないことは、ハイテク機では「学習効果」が出にくいことを示している。

この傾向はビジネスジェット機でも同じようである。一九九四年にリスボンで開かれた飛行安全財団FSFのセミナーで、エンブリ・リドル航空大学のウィーゼ教授が社用機のパイロットについて行った調査結果を発表したが、それによると、一年間、四〇〇時間、オートメーション化されたビジネスジェット機を操縦したあとでも、学習曲線は傾斜したままで漸近線に近付かない。同教授によれば、その原因は自動操縦のモードのわかりにくさにあるという。このモードについては、第二章で詳しく論じる。

機種別の安全性

前項で述べたような世代論は、実はたいへんルーズな、ある意味では正当さを欠く取り扱い方である。世代を同じくする機種のなかでも、設計思想はそれぞれのメーカや機種によって違いがあり、それが安全性を大きく左右する。このことを明らかにするのが、まさに本書の主要なテー

	機　種	死者数	事故件数	出発回数	出発100万回当りの死亡事故率
旧型機	B707/720	12	3	205,000	*
	DC8	276	4	776,417	*
	B727	297	3	8,092,473	0.37
	B737-100,200	287	8	8,997,020	0.89
	BAC111	7	2	375,000	*
	DC9	155	5	7,371,814	0.68
	F28	214	4	1,571,441	2.56
	B747-100,200, &300	53	2	2,278,277	0.88
	DC10	80	1	1,666,092	0.60
	A300	420	2	2,233,546	0.90
	L1011	0	0	1,104,250	0.00
新型機	BAe146	79	2	1,514,000	1.32
	B737-300,400, &500	431	5	11,971,023	0.42
	MD80	16	3	8,903,104	0.34
	B757	163	1	3,309,026	0.30
	F100	76	1	1,575,797	0.64
	A320	89	2	2,814,617	0.71
	MD11	2	1	300,973	*
	A310	248	3	1,059,362	2.83
	B767	223	1	2,658,766	0.38
	B747-400	0	0	851,564	*
	A340	0	0	53,628	*
合　計		3,128	53	69,683,190	平 均　0.761

（*：出発が100万回に満たない機種）

図 0-3　最近の機種別死亡事故率（1991～1995：ダグラス社資料に基づいて作成）　引用文献リスト(3)

マの一つでもある。

この観点から機種別の死亡事故率を比較してみたのが図0－3である。この図はダグラス社が発表した一九九一年から一九九五年の五年間の、機種別の死亡事故の統計を左側に示す。また、図の右側にはその数字に基づいて計算した一〇〇万回の出発（離陸）当りの死亡事故率を、棒グラフにして示した。上方の二つのブロックが旧型の狭胴機と広胴機、下方の二ブロックが新型の狭胴機と広胴機である。

この図に示した死亡事故件数と前の二つの図に示した全損事故件数は、数値では一致しないことに注意する必要がある。なぜなら、着陸後火災で焼失して全損になっても死者が出なかった事故や、死者が出ても損傷が軽微で全損事故には入らないものもあるからだ。

図0－3は死亡事故率は世代別よりも機種別の違いが著しいことを示している。したがって、よく言われている「新世代機では技術が進んだから安全性が高くなった」という考えがいかに粗雑なものかがわかる。自動化をどのように適用し、その結果がどうなったかは、機種ごとに検討しなければならない。

旧型機のなかでもB727、L1011、DC10などは、新型機にひけをとらないほどよい安全記録を残している。逆にF28は飛び抜けて悪いが、この航空機は一九五〇年代末に就航した古いもので、主にアジアやアフリカで事故が起こっていることから考えると、この高い事故率は、

古い機材を使って不利な環境のもとで運航していることからくる、地域的特性を表していると見ることができる。

新型機のなかではエアバス系のハイテク機、とくにA310は成績がよくない。ボーイングのB757は一九九四年までは成績がよい。しかし、一九九五年コロンビアで、翌一九九六年にはドミニカとペルーでたて続けに墜落事故を起こしたから、統計期間をもう一〜二年延ばすと、とくに安全性が高いとは言えなくなるだろう。

図0―3は、図0―1と図0―2が暗示したある真実をはっきりと示している。それは、定期航空機の今日の安全性は、ジェット化技術がようやく成熟期に入った第二世代の旅客機と、初期の自動化技術を使った第三世代機によって達成されたものであること、またその後著しく高度化された自動操縦技術が安全性の向上に寄与したかどうかは、機種によって大きく異なるということである。

技術の高度化が、航空機全般の安全性の改善につながらないのはなぜであろうか。それは本書で詳細に考察するが、議論の対象が多岐にわたるので、論旨を明らかにするために、ここで敢えて結論を先取りすることを許していただきたい。その原因は次の二つである。

（一）ジェット旅客機の安全性をさらに高めるためには、技術は手詰まり状態になっている。とくに、ハイテク機ではコンピュータ技術が高度に利用されているが、人と機械の調和が十

分には図られておらず、そのため人的要因が絡んだ不安全要因、いわゆるヒューマンファクターズの負の側面が強調されて現れた。航空技術は一九四〇年代の「音の壁」、一九七〇年代の「熱の壁」に続いて、いまや第三の壁、すなわち「人間の壁」に突き当たっている。

（二）競争が激化する航空機市場でしのぎを削っている世界の航空機メーカは、安全性、経済性（低運賃）、定時性、快適性などの、並立し難い諸要求を満たす技術として自動化に努力したが、その高度化を急ぎ過ぎた。高度な信頼性を必要とする民間航空の技術は、成熟するのに時間がかかる。

この二つは仮説であり、それが正しいか否かは、本書の各章で具体的な検証を試みる。ただし、本書の目的は自動化技術を否定することではなく、自動化が今まで必ずしも成功していないという認識に立って、その原因を実証的に究明しようとすることである。

まず第一章では準備として自動化の歴史を振り返り、第二章以降では自動化の失敗の実例を挙げ、またその原因について考察することにしよう。

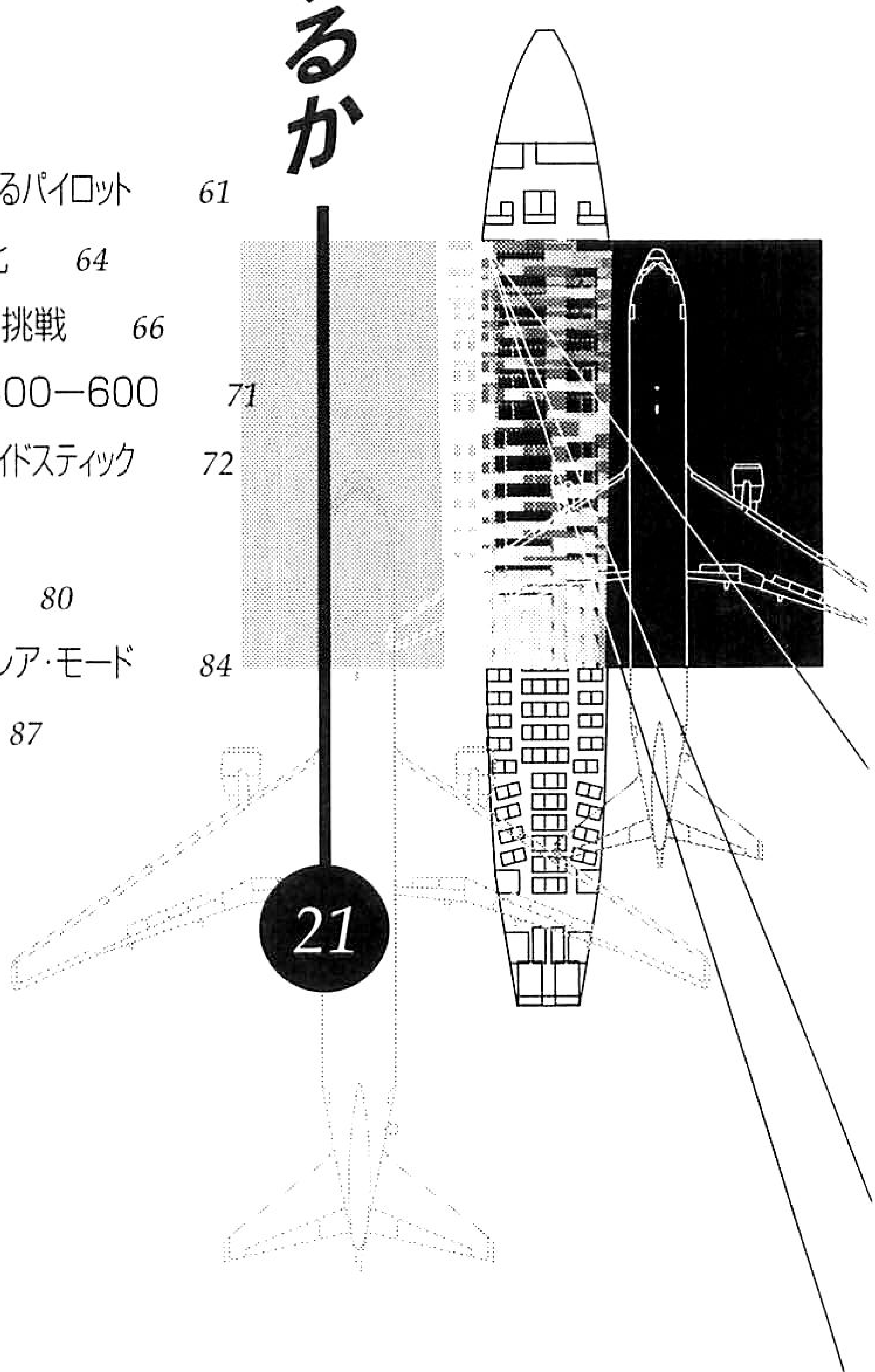
目次

はじめに　5

機種別の安全性　10

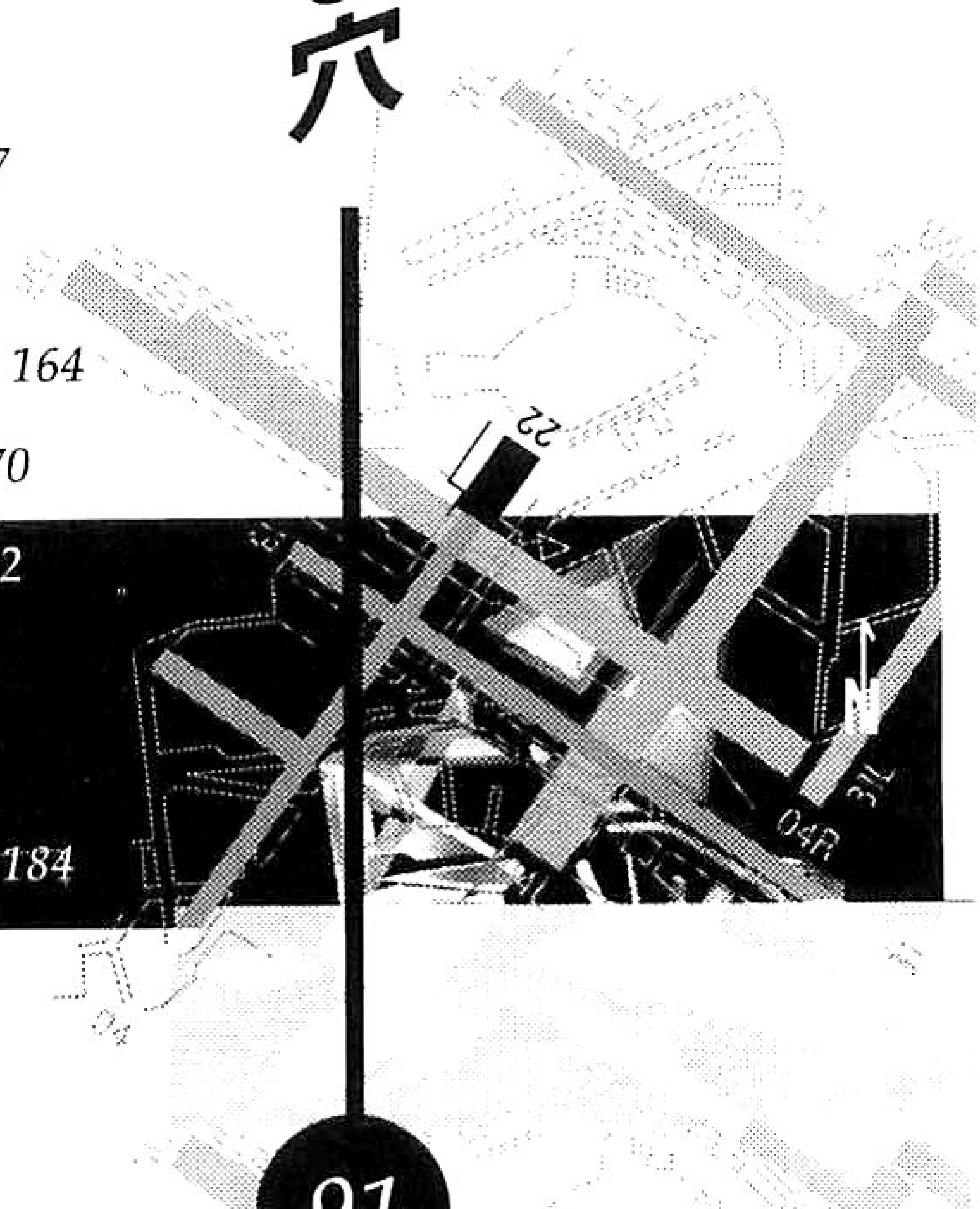
第一章　なぜ自動化するか　21

視力こそいのち　24
世界最初の無視界飛行　28
計器着陸の先駆　31
地面のなかへ制御された飛行　35
フライトディレクタ　37
ウェザー・ミニマ　40
自動着陸に向かって　43
着陸の基本条件　45
フライ・バイ・ワイア　49
自動操縦の階層　51
安定性増大　52
操縦性増大　57
コントロール・ループから外れるパイロット　61
ナビゲーションの自動化　64
エアバスインダストリの挑戦　66
過渡期のハイテク機A300―600　71
プッシュボタン・テクノロジとサイドスティック　72
Cスター制御　74
堅固なプロテクション　80
ピッチ姿勢維持モードとフレア・モード　84
こいつ、いいやつだ　87
技術の復讐　89



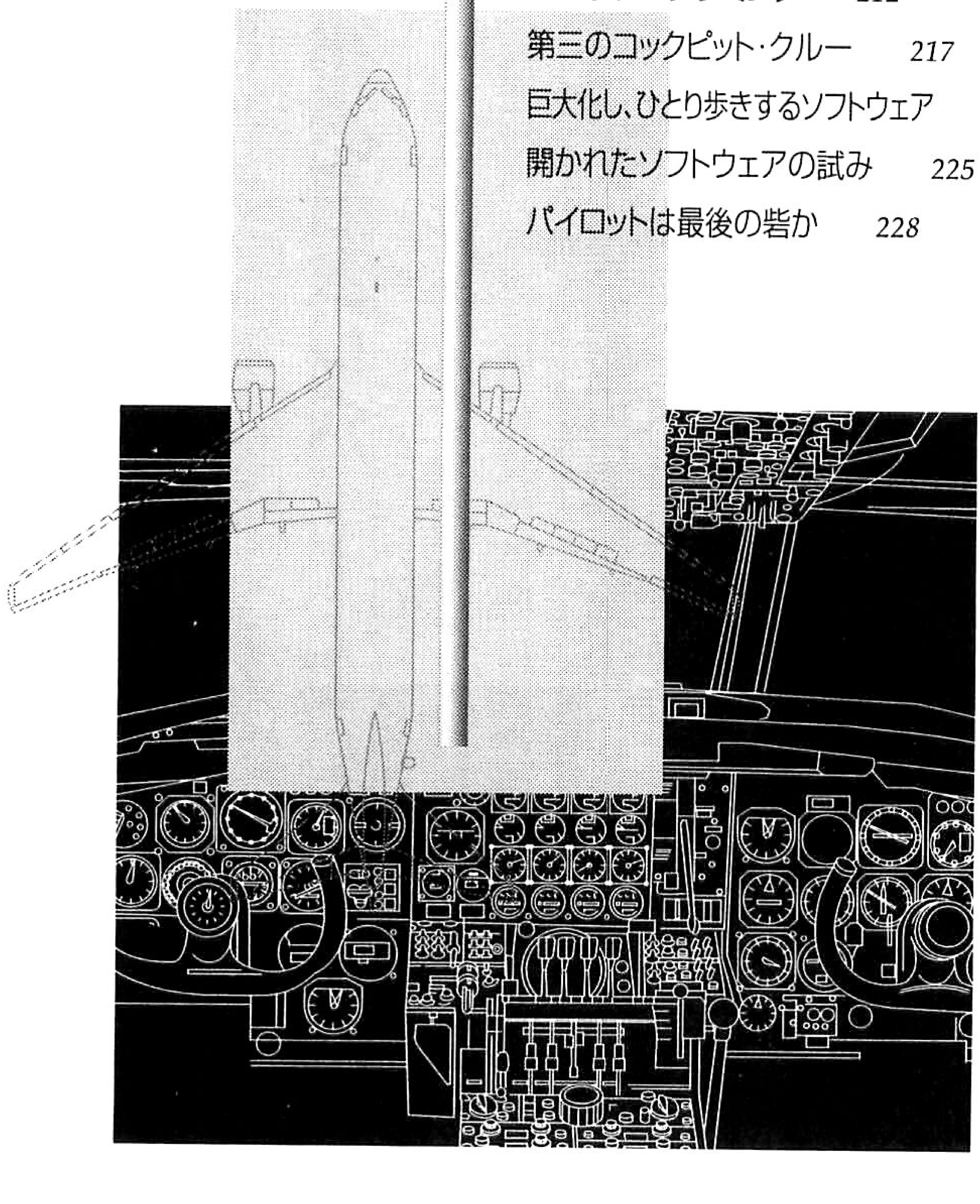
第二章 自動化の落とし穴

冥界への飛行　93
ヒマラヤの谷間で　96
アンデスに迷う　99
生き残った機長　108
過剰な保護　115
機械に頼る心　117
詰まったパイプ　120
モード混乱　129
見えないモードの動き　136
ストラスブールで　141
バンガロールで　145
隣はなにをする人ぞ　151
オーバーライドの悲劇　157
マニュアルの謎解き　160
オーソリティをめぐる争い　164
設計は運航経験に学べ　170
ベテランも新人もない　172
カオスの縁　178
高度な操縦技術　181
訓練強化か設計見直しか　184



第三章 コンピュータと人間

コンピュータ・リテラシ 190
設計者が操縦する航空機 194
コンピュータ化についていけない人々 198
アフォーダンス人間 201
記号化貧乏 203
暗黙知はプログラムできない 207
コンピュータの聖域 211
ユーザプログラミング 212
第三のコックピット・クルー 217
巨大化し、ひとり歩きするソフトウェア 220
開かれたソフトウェアの試み 225
パイロットは最後の砦か 228

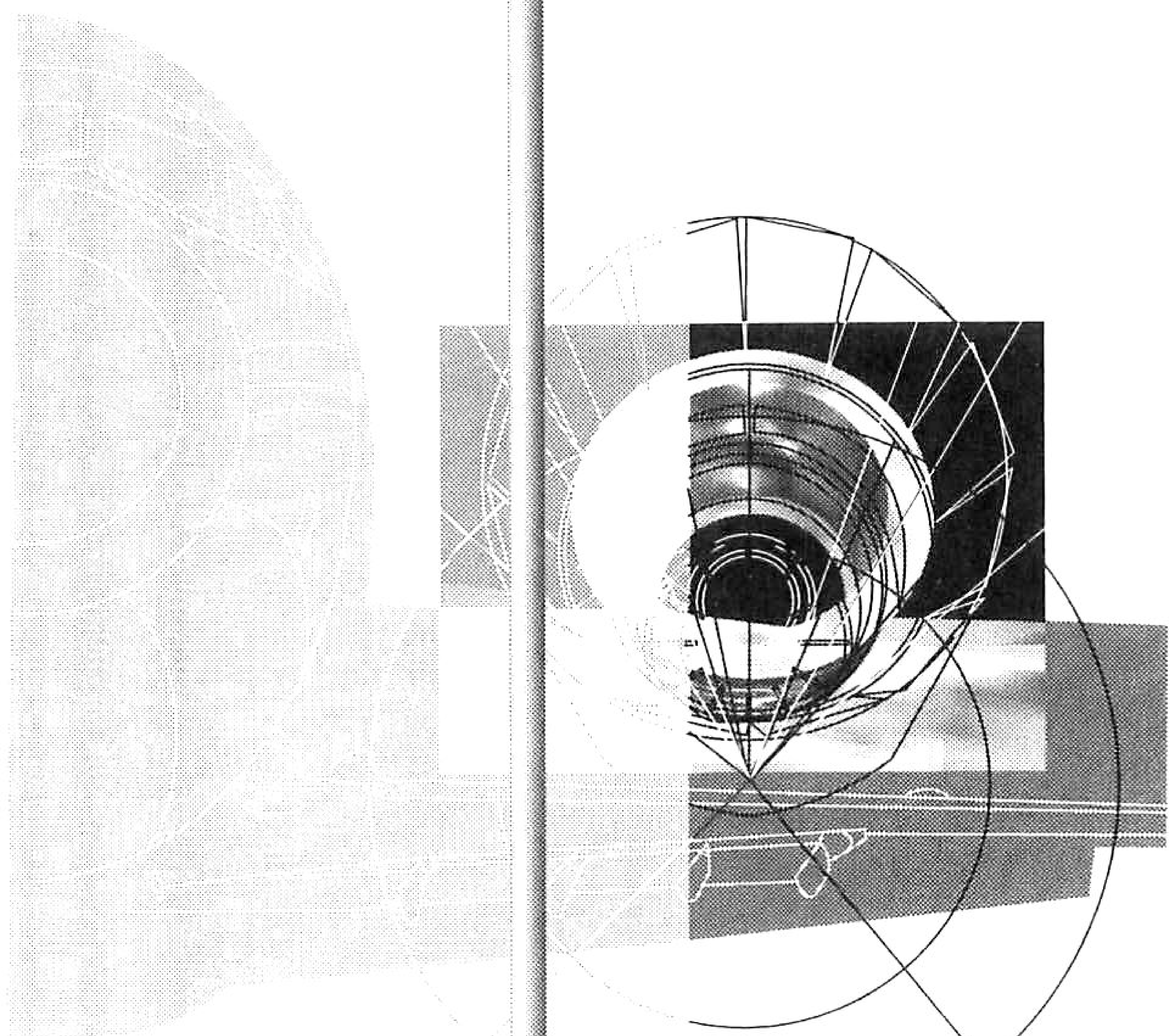


第四章 自動化はいかにあるべきか 233

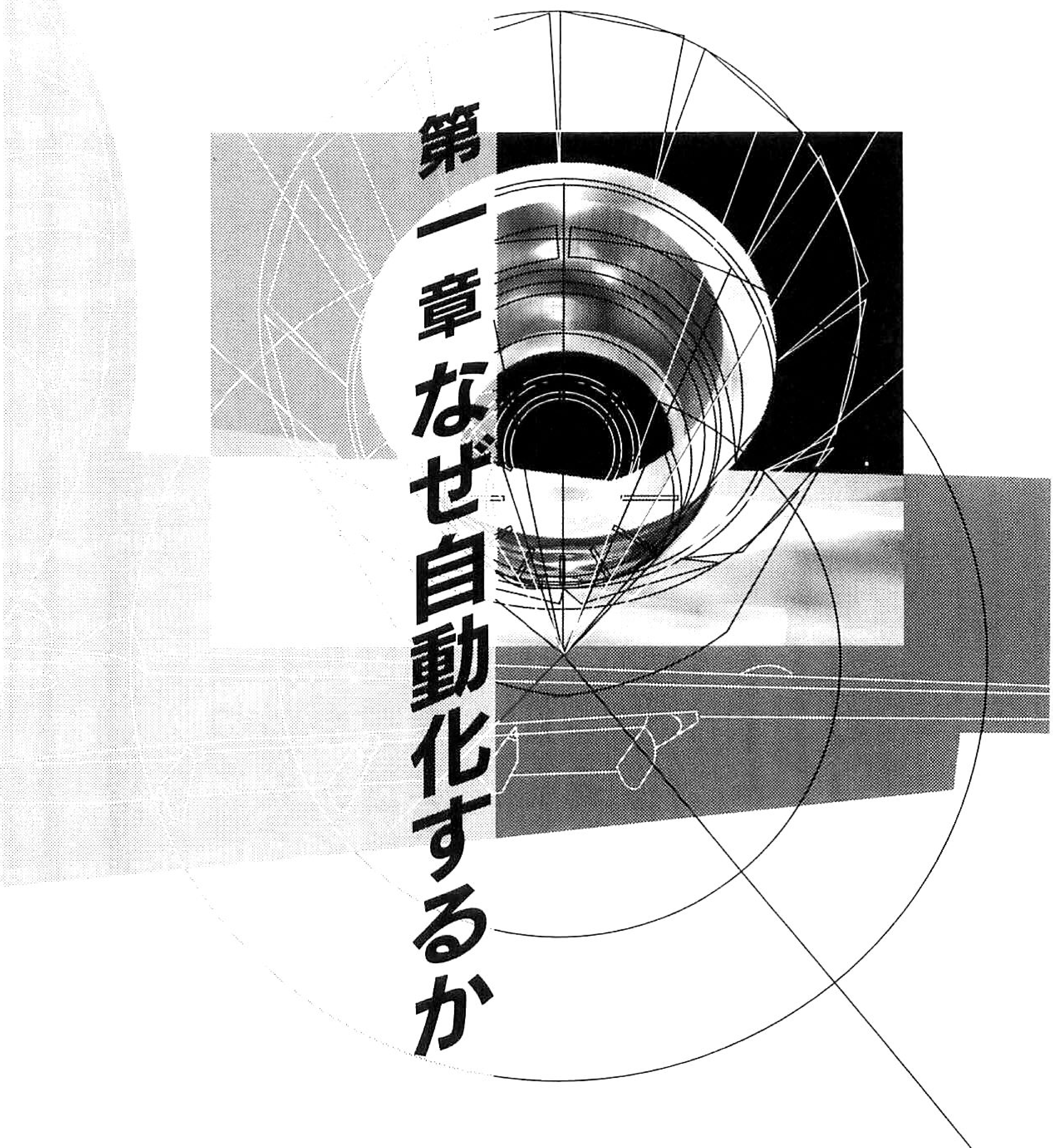
「技術中心の自動化」の誤り 234
スーザンさんの犬 236
コントロールの本拠は人間 239

おわりに 243

引用文献リスト
索引



第一章　なぜ自動化するか



ギリシャ時代のアリストテレスは奴隷制を肯定し、それが廃棄できる唯一の場合は、我々が使う道具を単なる命令や動作一つで動かすことができるようになった場合、つまりロボットが実用可能になったときであると考えた。また一八世紀、ディドロと共に啓蒙思想の金字塔ともいうべき『百科全書』を著したフランスの啓蒙思想家ダランベールは、手仕事は奴隷のすることであって、機械の目的はわれわれをそのような労働から解放することでなければならないと考えた。

機械化の究極の形が自動化である。しかし、これまでの航空技術の歴史をみると、飛行の自動化はパイロットを労働から解放することではなかった。航空機の自動化はパイロットに新しい、より高度な資質を要求したのである。

もともと、飛行は人類の天賦の能力ではなかった。人類は初め鳥の飛行を模倣しようとしたが、体重に比べて筋力が不足し自力では浮揚できない。そこでエンジンの発生する動力を利用し、羽を機械化した翼を備えた現在の固定翼機の形態を作り上げた。その意味で、機械化は人類飛行の原点であった。

今日に至るまでに、航空機の自動化は二つの段階を経てきた。最初は操縦操作の自動化で、エレベータ、エルロン、ラダーなどの操縦面（舵面）とエンジン推力を自動的にコントロールして、航空機の性能とパイロットの操縦能力を増強することだった。この段階の自動化はパイロットの感性にもよく適合し、ジェットエンジンの高い信頼性と相まって、一九六〇年代から七〇年

代にかけてジェット旅客機の安全性を飛躍的に高めた。しかし、この段階ではまだパイロットの操舵を必要とするので、完全な自動化とは言えない。

第二の段階は航法の自動化で、離陸後の上昇、巡航、降下、進入から着陸に至る飛行全般を飛行管理コンピュータによって自動操縦で行うものである。これこそが現在の航空機の自動化の最も際立った特徴であると同時に、最大の問題点なのである。

機械と動力を使って飛行能力を手にしたのちに人間が目指したのは、感覚器官に頼る飛行からの脱却であった。まず、視覚に頼った飛行の限界を破る無視界飛行は、軍事航空では夜間や悪天候下での作戦上の要求から、民間航空では夜間や霧の中での運航を確保するために開発された。これは計器を頼りに飛行するので、当然、飛行計器の発達を促した。

一九八〇年代に入ってから、離着陸などの特別な飛行段階以外は、パイロットの入力をほとんど必要としない、航法の自動化が進んだ。車でもカーナビという似たような技術があるが、それはコースのガイダンスを与えるだけで、真っ暗な夜道を自動操縦で走り玄関に横づけするようなことは、誰も考えてはいまい。ところが、航空機の自動化ではそれに似たことが要求され、一部は実行されている。このように、航空機の自動化は「自動操縦」と呼ぶよりは「自動飛行」と呼ぶのが適当な段階に進んでいる。

ジェット旅客機で、これほどまでに自動化が進んだのはなぜであろうか。第三世代までのジェ

ット機によって達成された安全性では不足があったのだろうか。自動化がさらに進んだ理由は、端的に言えば一九八〇年代に始まった世界的な石油危機と規制緩和による競争激化のなかで、世界の航空機市場で優位に立とうとする航空機メーカが、安全性と経済性をセールスポイントにした新世代のジェット旅客機を開発し、エアラインもこれを受け入れたからである。これについては、第二章で詳しく述べることにし、この章では計器飛行から自動飛行に至る技術の流れを追ってみよう。

視力こそいのち

動物が移動するとき、目は最も重要な働きをする。チャック・イエーガーは、ロケットで推進されたX1を駆って一九四七年一〇月に世界で初めてマッハ一を超え、米国の国民的英雄になった人であるが、その自叙伝『イエーガー――音の壁を破った男』(バンタム・ブック刊)のなかで、「わたしは、生まれながらに異常なくらい視力と筋肉運動の協同が良かった。……これが正しい資質なのだ」と自賛している。

また、ゼロ戦を駆って撃墜王とうたわれたわが国の空の英雄坂井三郎氏も、「今日のように、戦闘機用のレーダーや効率のよい通信機をもたないその頃の空戦においては、空中で敵と戦う任務をもった私たち戦闘機操縦者は、まず第一に優秀な視力をもっているということが絶対的な条

件である」と、著書『大空のサムライ』（光人社刊）のなかで書いている。
このように、パイロットに必要な素質は、なによりもまず視力なのである。ところが、この優れた素質も霧で先が見えないときには全く役に立たない。ダスト、砂嵐や雪嵐の中も同じである。では、パイロットが視覚を奪われると何が起こるのだろうか。
視覚情報がなくなると、とくに地平線が見えないと、パイロットは方向感覚を失う。そのとき人間の感覚はたいして当てにならない。ある方向に旋回しているときでも、反対方向に旋回していると感じることがよくある。そんなときパイロットは混乱し、計器を信じるよりは自分の感覚のほうを信じる。一九二〇年代には、大勢の軍人パイロットや民間の郵便飛行機のパイロットが、このために命を落とした。
一九二六年に米国陸軍航空隊付きの医者だったメイヤー大尉が、地上の回転椅子を使って目かくしをしたパイロットについて模擬実験をしたところ、意外な結果が得られた。
回転速度が一定になったとき、目かくしをしたパイロットは自分がどっち方向に回転しているかわからなくなった。回転が遅くなり、あるゆっくりした速度に落ち着くと、パイロットは回転が止まったと感じ、そして回転が本当に止まったときは逆方向に回転していると思ったという。
このことは次のように説明される。人は普通、自分の平衡を視覚、触覚、聴覚、筋肉、および内耳前庭器官によって維持している（図1－1）。飛行方位に関しては触覚と聴覚は重要ではな

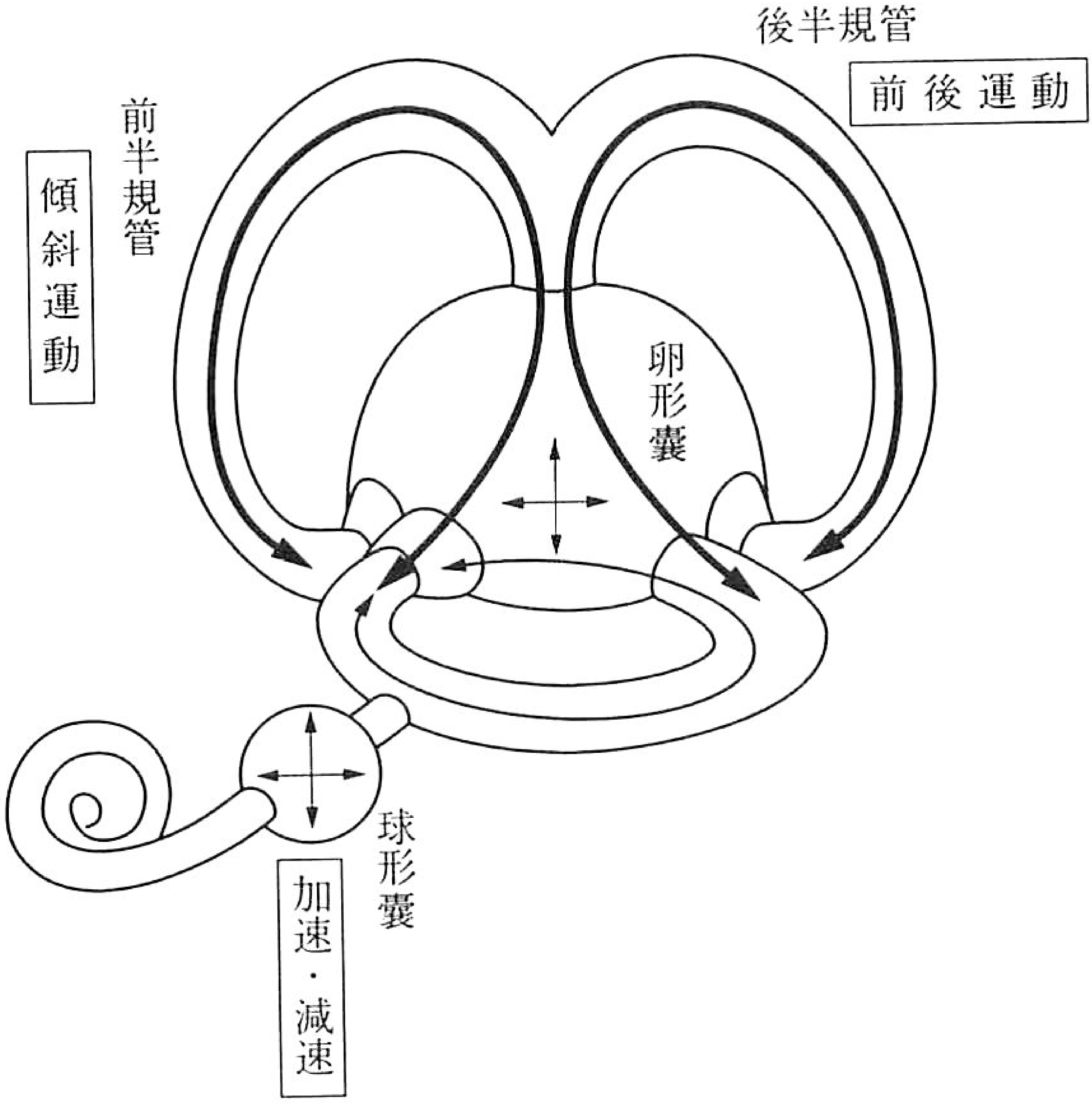
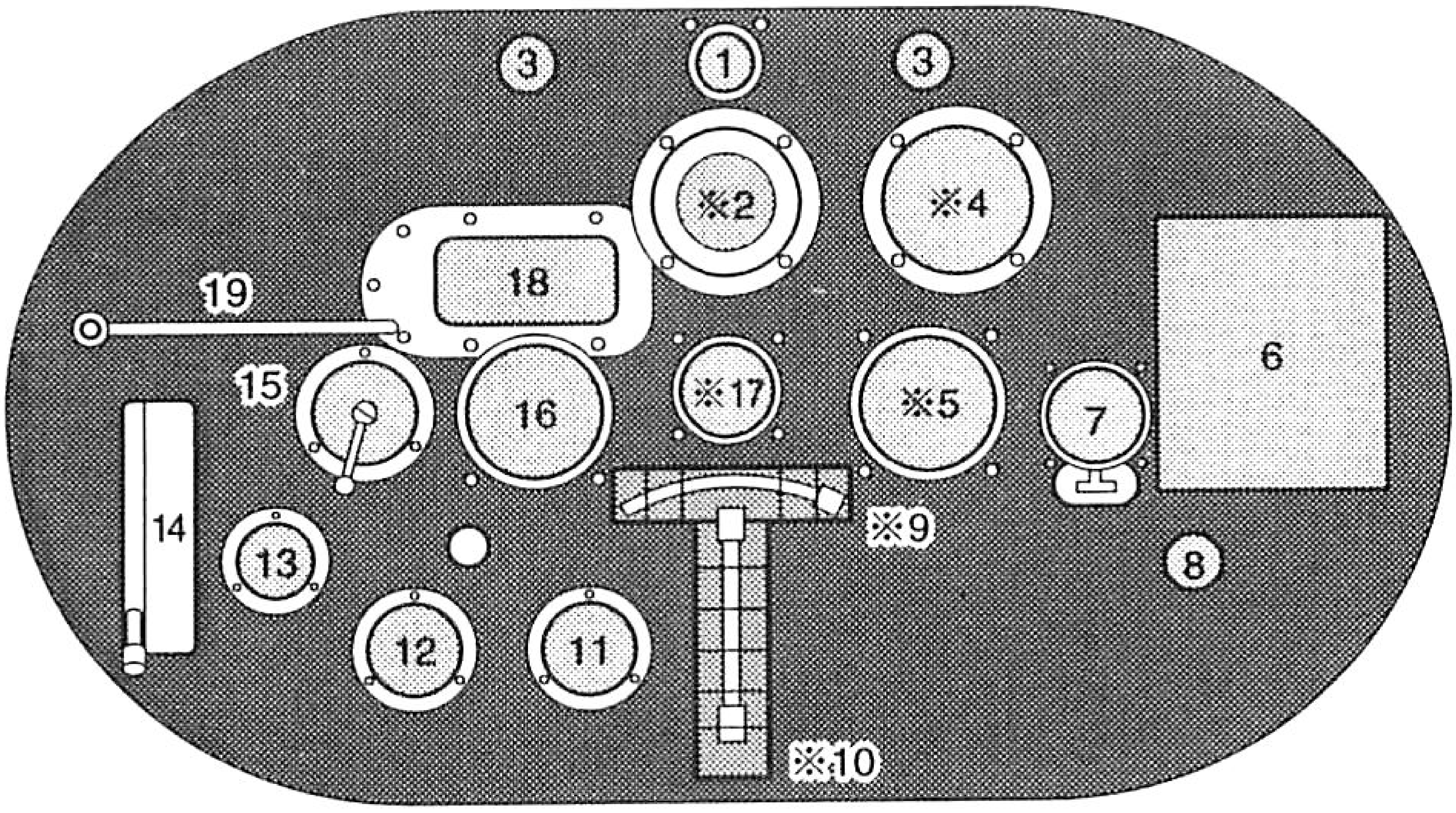


図 1-1　内耳前庭器官（卵形嚢と球形嚢）

い。残りの視覚、筋肉、内耳前庭器官の三つの感覚でパイロットは自分の位置と運動の速度・方向を正確に感じとり、地球に対する自分の方位を知るのである。

位置が動いただけなら、平衡感覚器官である内耳前庭器官のなかのリンパ液はすぐに動きを止めるから、運動感覚は残らない。しかし回転するときは別で、液体の動きが止まるまでに五〜二五秒もかかる。この時間内はパイロットはバーティゴ（空間識失調）と呼ばれる誤った運動感覚を経験する。そのためパイロットは混乱し、機体の姿勢を維持できなくなり、スピン（きりもみ運動）に



1 鏡	12 燃料計
※ 2 誘導磁力計式コンパス	13 油圧計
3 照明	14 混合コントロール
※ 4 高度計	15 マグネット・スイッチ
※ 5 対気速度計	16 回転計
6 コンパス修正チャート	※17 旋回一バンク計
7 八日巻時計	18 潜望鏡
8 導火線操作ノブ	19 同上ハンドル
※ 9 横水準儀	
※10 縦水準儀	※：航法計器
11 油温計	

図 1-2　セントルイス魂号の計器盤

陥る。そして最悪の場合、そこから回復ができないと墜落する。

今日の進歩したジェット機でも計器からの姿勢情報が得られなくなると、昔の飛行機と全く同じ状態になる。例えば一九九五年五月二四日のこと、英国の国内線を運航しているナイト航空のバンデイランテ型機がイングランドのリーズ・ブ

ラッドフォード空港を離陸しスコットランドのアバーディーンに向かって飛んでいたが、雲のなかで乱気流に遭遇したとき、運悪く人工水平線インジケータ（ジャイロスコープを使って水平線を表示する飛行計器）が故障してしまった。視界がなく水平感覚を失ったパイロットは、荒れた気流のなかで機体を水平に維持できなかった。機はらせんを描いて急降下し、速度が機体の強度限界を超えたため、地面に衝突する前に機体の一部はすでに分解を起こしていた。乗客九人と乗員三人全員が死亡した。

初期の自動化の課題は、このような姿勢と位置についての情報の取得を、人間の感覚に完全に依存した飛行からの脱却であった。それは計器だけに頼って飛ぶため、飛行計器の進歩を促した。

一九二〇年代後半の標準的な計器類は、例えば、リンドバーグが大西洋横断単独無着陸飛行に初めて成功したときのセントルイス魂号の計器盤（図1―2）のようなものである。いくつかの計器のうち、パイロットが機体の姿勢と方向を維持するために使う航法計器は2、4、5、9、10、17の六つである。

世界最初の無視界飛行

米国空軍のジミー・ドーリットル将軍は、第二次世界大戦の空の英雄である。一九四二年四月

一八日、わが国の東方沖一二〇〇キロメートルに接近した空母ホーネットの艦上から発進した一六機のボーイングB25型爆撃機を指揮して、初めて東京爆撃を敢行し、中国に着陸した。この作戦の成功は緒戦の勝利で慢心していた日本に衝撃を与えた。

この軍人パイロットは、まだ若いころ、ダニエル・グッゲンハイムという実業家が創立した航空振興財団に協力を依頼されて、世界で初めて無視界着陸に挑戦した。

当時の高度計、バンク角を指示する横方向水準器、および方位を測る磁気コンパスの精度は、無視界着陸をするためにはどれも不十分であった。そのため、ドーリットルはポール・コールスマン社に依頼して、スイスの時計メーカから最高精密級のリンク機構を取り寄せて計器の指針の動きを拡大し、高度を三メートルの精度で表示できる高度計の開発に成功した。この精度は当時の標準装備の計器の数倍という高いものであった。また、残りの二つについては、スペリー社が製造したジャイロスコープを利用した人工水平線と、方向ジャイロを使って機体姿勢と方向を表示する計器を開発した。とくに、このジャイロの実用化は初期の操縦自動化の核心をなすものであった。

新しく開発したこの三つの計器を搭載したコンソリデーテッドNY2型機を操縦して、ドーリットルは一九二九年九月二四日の霧の深い朝、ニューヨーク近郊のミッチェル・フィールドで無視界飛行と無視界着陸に成功した。しかし、二回の一八〇度旋回を含む無視界飛行を終えて着陸

しようとしたとき霧が晴れかかったので、コックピットの窓にフードで覆いをして計器情報だけで進入した。接地はバウンド気味だったが、無視界着陸はとにかく成功した。

ニューヨーク・タイムズ紙は「無視界の飛行機が一五マイル（二四キロメートル）飛んで着陸した。霧の危険は征服された」と報じた。残念ながらフード付き飛行だったので、この飛行記録は非公式とされた。

公式の記録保持者はアルバート・ヘーゲンベルガーという軍人パイロットで、その単独無視界飛行は一九三二年五月九日に行われた。

ドーリットルの無視界飛行は、機上に搭載された計器だけを使って行われたわけではない。進入方位を指示する電波を発射するホーミング・レンジと、滑走路端の位置を指示する上向きの扇状電波を発射するマーカービーコンを滑走路の西と東に設置し、それが発信する電波を機上のラジオで受けて、滑走路に対する自機の位置を確認しながら着陸を行った。このように、計器飛行には地上からの電波誘導が、始めから欠かせなかった。今日では進歩した航法援助設備がたいていの空港に設置され、着陸してくる航空機にガイダンスを与えている。

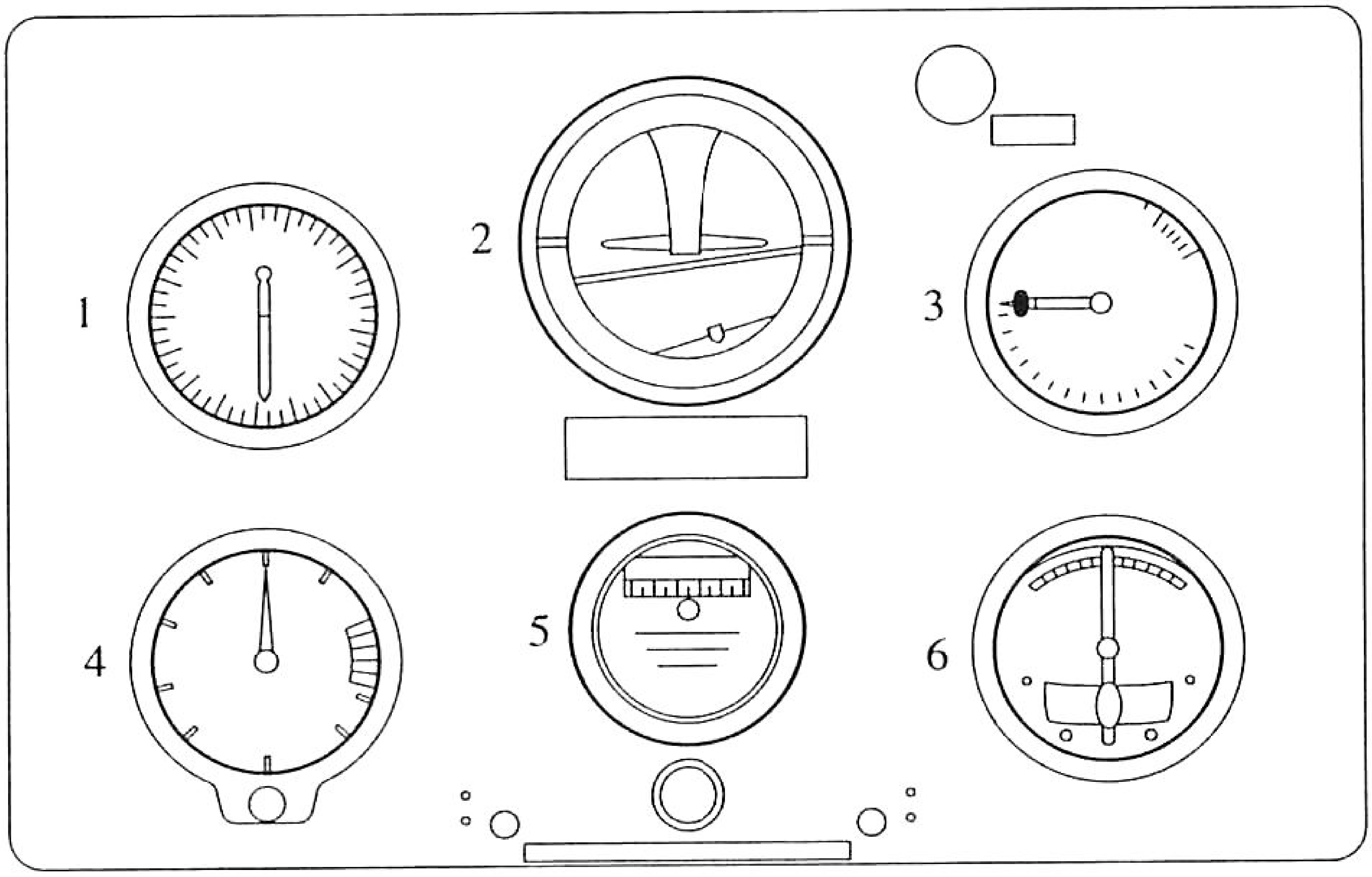
人間の視覚を「いのち」にしてきた有視界飛行から計器飛行への移行は、その後の自動操縦につながる画期的な変革であったが、一方、パイロットにも意識改革が必要であった。それまでは目で水平線を視認し、内耳の平衡感覚器官や、いわゆる「パンツの底」で機体の運動を認知して

その動きに反応してきたパイロットが、今度は計器によって飛ぶことを学ばねばならなかった。すなわち、自分の視覚と身体感覚を意識的に無視して、飛行計器から供給される情報のみに頼りきるように、心と身体を自ら鍛え直さなければならなかった。この「しつけ」は今でも大型ジェット機のパイロットを目指す若い訓練生が乗り越えなければならない最初の関門である。

新世代のジェット機のパイロットの訓練で重要な項目になっているのは、計器情報から現在の飛行状態と自動化されたシステムの動作を認識する能力である。高度に自動化された航空機では、人間の能力は不要になると考えるのは大きな誤りである。自動化が導入されたのは、人間の機能をはるかに上回る機能を、人間が機械と一体となって実現するためである。そのような人間—機械系のなかでは、人間に対してはモニターの役割と総合判断力などのシステム制御能力が要求される。したがって、その基礎としての計器飛行能力の重要性は、少しも失われていない。

計器着陸の先駆

ヨーロッパの気象条件は悪い。前述のチャック・イエーガーは米空軍大佐としてドイツのハン基地に駐在したことがあるが、その自叙伝で「ヨーロッパの航空気象は世界最悪である」と書いている。そのため、ヨーロッパ諸国では計器飛行が早くから行われた。一九三〇年代に英国空軍の標準装備になった無視界飛行パネル（図1—3）には、ジャイロコンパスと人工水平線が含ま



1. 対気速度計　4. 高度計
2. 人工水平線　5. ジャイロコンパス
3. 垂直速度計　6. 旋回・横すべり計

図 1-3　盲目飛行パネル

れている。この計器類が第二次世界大戦中のドイツ本土への夜間と悪天候下での航空作戦への道を開いた。戦後も英国空軍の爆撃部隊は一九五七年から定期的に無視界着陸を実施している。ヨーロッパは霧の多い気候条件から無視界着陸の必要があったのである。

英国空軍は計器飛行による着陸を地上から援助するため、すでに第二次世界大戦中に計器着陸システム（ＩＬＳ、図１―４）を開発した。この着陸援助施設はその後、世界各地の多くの空港で使われるようになった。ＩＬＳは空港に進入し着陸しようとする航空機

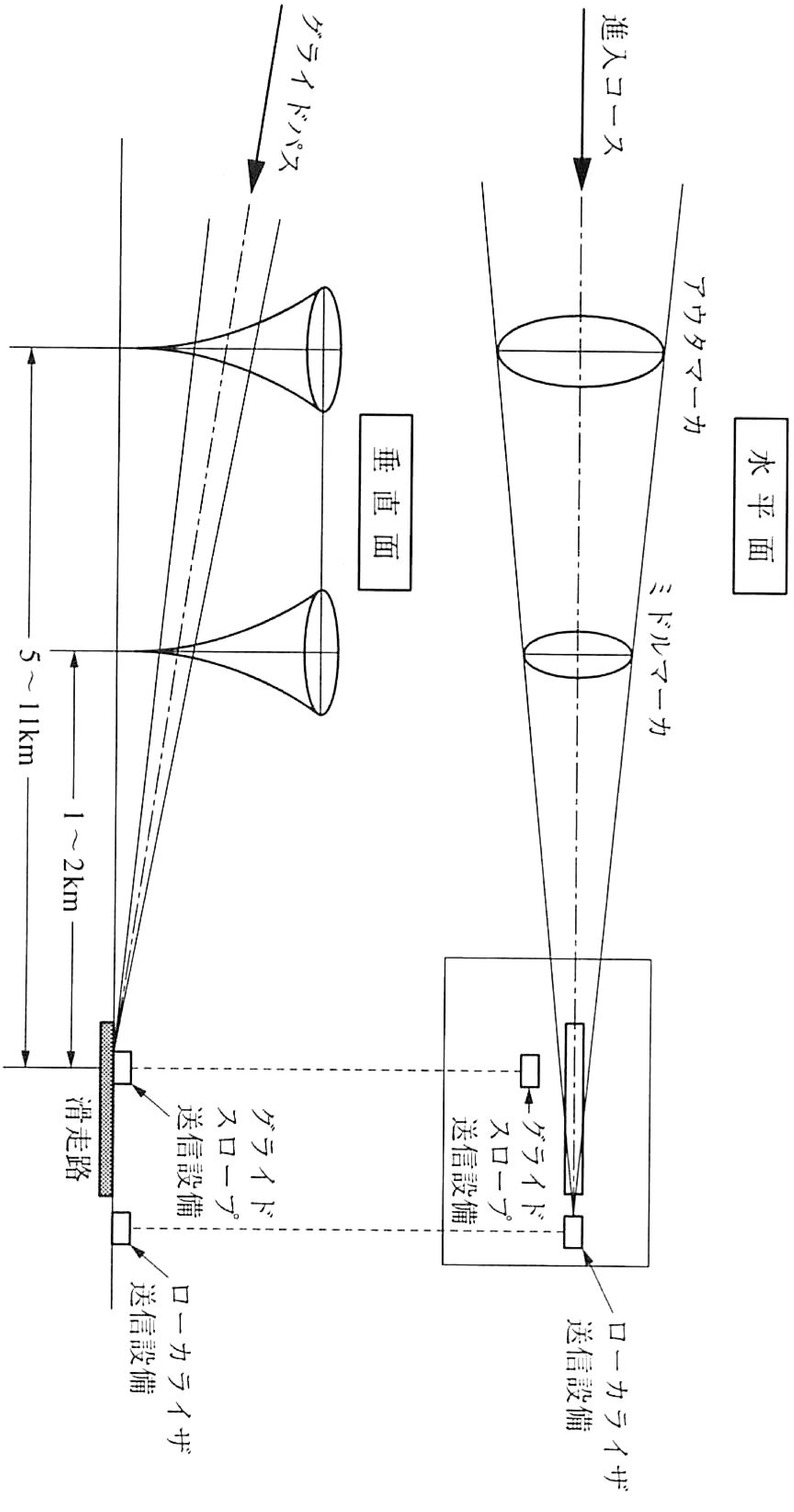


図1-4　計器着陸システム（ILS）

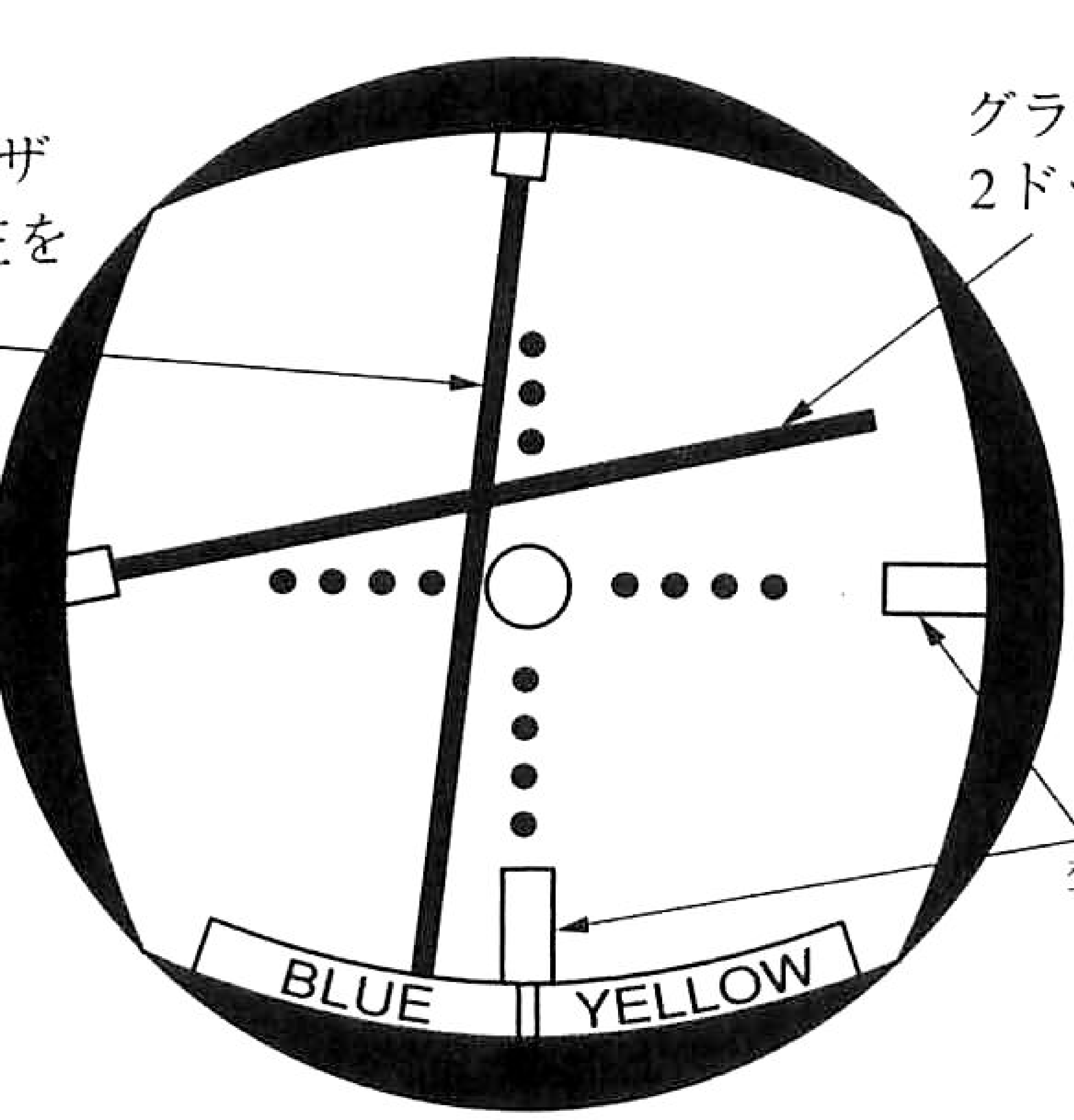


図 1-5　ILSインジケータ

に地上からの二つの指向性誘導電波（ローカライザとグライドスロープ）を発射する。機上のＩＬＳインジケータ（図１－５）にはローカライザから発射されるＶＨＦ波の垂直波面は縦のポインタで、またグライドスロープから発射される進入飛行経路の傾斜面を指示する波面は横のポインタで表示される。滑走路中心線上に機体が乗っていないと、ローカライザ・ポインタは左右にずれる。また、機の上下位置が指示された傾斜面からずれると、グライドスロープ・ポインタが上下にずれる。パイロットはこの二つのポインタが画面の中心で交差するようにエレベータとラダーを操舵すればよい。

このように地上の航法援助設備からの誘導電波で指定された飛行経路に沿って進入することを「精密進入」という。この場合の飛行経路は

水平から約三度傾いた直線になる。これに対し、パイロットが飛行計器で高度と距離を知り、外界を見て位置を確かめながら、自分で飛行経路を決めて進入することを「非精密進入」という。このとき飛行経路が階段を一歩一歩降りるような形になる場合は、「ステップダウン進入」と呼ばれる。

地面のなかへの制御された飛行

最近、航空機のエンジンや機体には何ら異常がないにもかかわらず、パイロットの誤った判断や誤った操縦によって高度を失い、滑走路手前の山地や地面に衝突する「地面のなかへの制御された飛行（ＣＦＩＴ：Controlled Flight Into Terrain）」という事故が関係者を心配させている。米国をベースにして活動している飛行安全財団（ＦＳＦ）は、ここ数年この種の事故を半減させることを目標にして専門の作業部会を設けて積極的に活動している。この財団が事故原因を分析した結果、この種の事故は地上からの誘導電波に乗らない、いわゆる非精密進入のとき起こりやすいことが分かった。

同じような調査を、以前、米国の航空宇宙局とボーイング社が共同で行ったことがある。それによると、一九五九年から一九八二年の間に起こったジェット輸送機の事故の五〇パーセントは、空港へ進入する最終段階で起きているが、その事故の原因は視程が悪いときに手動操縦で進

入を行ったことに関係がある。また、米国の国家運輸安全委員会が一九七〇年から一九七五年の間に起こった一七件の進入段階での事故を調査した結果では、そのほとんどは滑走路が目によって確認されたあと、パイロットが計器飛行から目視飛行に切り替えたあとで起こっている。最近は一九九七年八月に、大韓航空のB747型機がグアムで着陸に失敗して墜落したのも、地上の着陸誘導設備（ILS）がたまたま故障していて、誘導電波の一つであるグライドスロープを利用することができなかったためである。パイロットは外部の視界と計器だけに頼る有視界飛行方式で、夜間、激しい雨が降っている中で、高度を確認しながら降下しなければならなかった。機は滑走路の約五キロメートル手前の丘に激突し、乗員乗客二五四人中二〇〇人が死亡した。

また、一九九七年九月にインドネシアのスマトラ島で起こったガルーダ航空のエアバスA300型機の事故は、大規模な山火事による煙のため視界不良のなかを着陸しようとしたとき、管制官の指示の混乱もあって、空港手前の丘陵に迷い込んで地面に衝突したものである。

このような事実が示すように、地上からの誘導電波を使ってパイロットに操縦ガイダンスを与えることは、航空機事故の防止に有効である。この初期段階の航法援助設備の導入は、パイロットの状況認識能力を高め、それによって飛行の安全性を高めることに大いに役立ち、一九七〇年代後半から一九八〇年代初めにかけて、事故率が著しく減少する原因の一つになった。

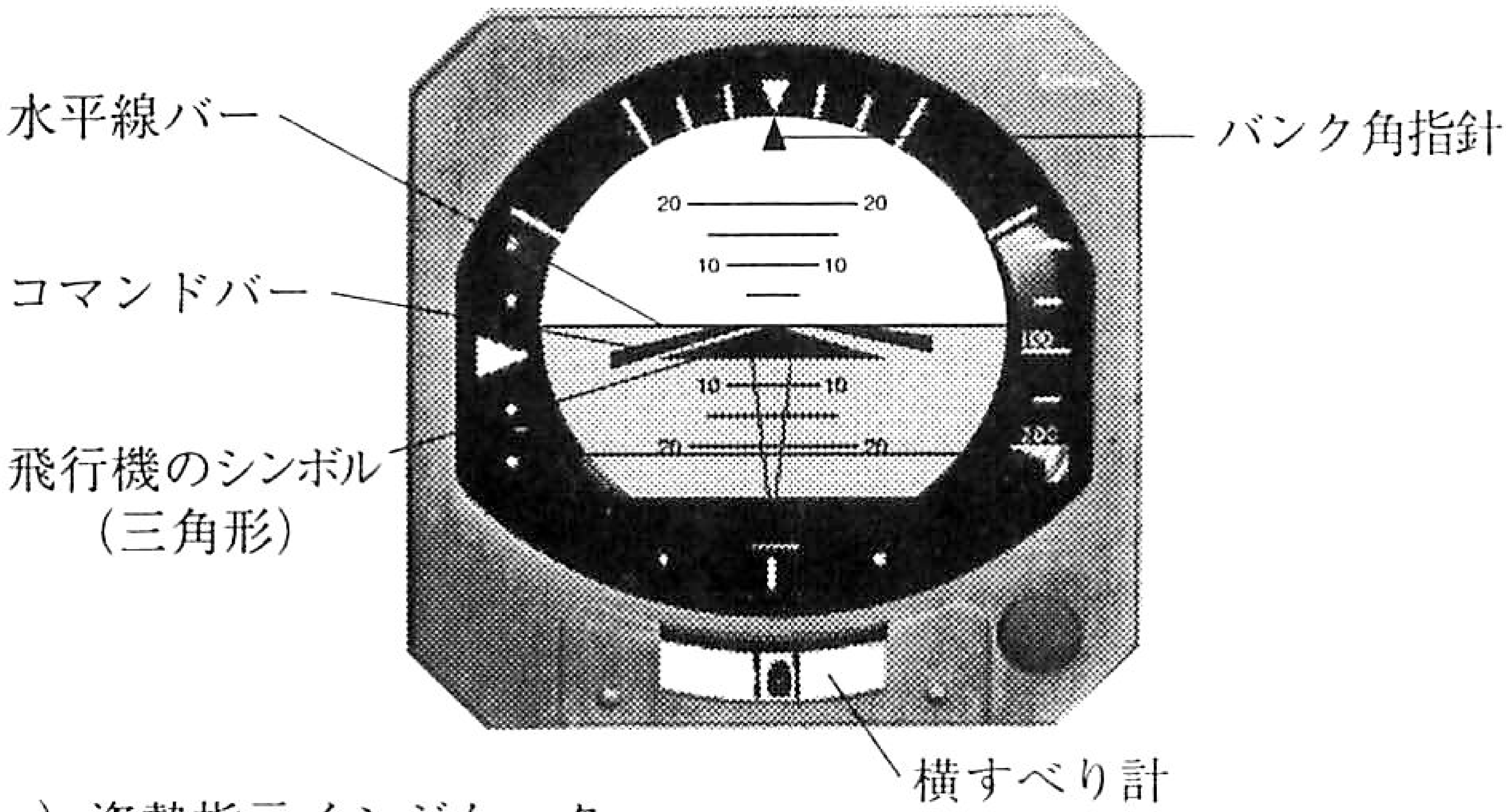
フライトディレクタ

前に述べたように、ＩＬＳインジケータは初期の航法誘導システムである。パイロットは、このインジケータの画面上のローカライザ・ポインタとグライドスロープ・ポインタのずれが両方ともゼロになるようにエルロンとエレベータを操舵する。しかし、その操舵量をいくらにするかの判断はパイロットに任せられている。エレベータ、エルロン、ラダーの三舵の間のバランスをうまくとらないと、飛行経路からの高度のずれや横滑りが起こる。とくに進入から着陸への飛行段階では、変動する風の中であっても飛行経路を非常に正確にコントロールしなければならない。その一方、チェックリストその他の着陸準備作業や地上の管制官との交信など数多くの作業が同時進行するため、パイロットの負担は一層重くなり、高い熟練度が要求される。

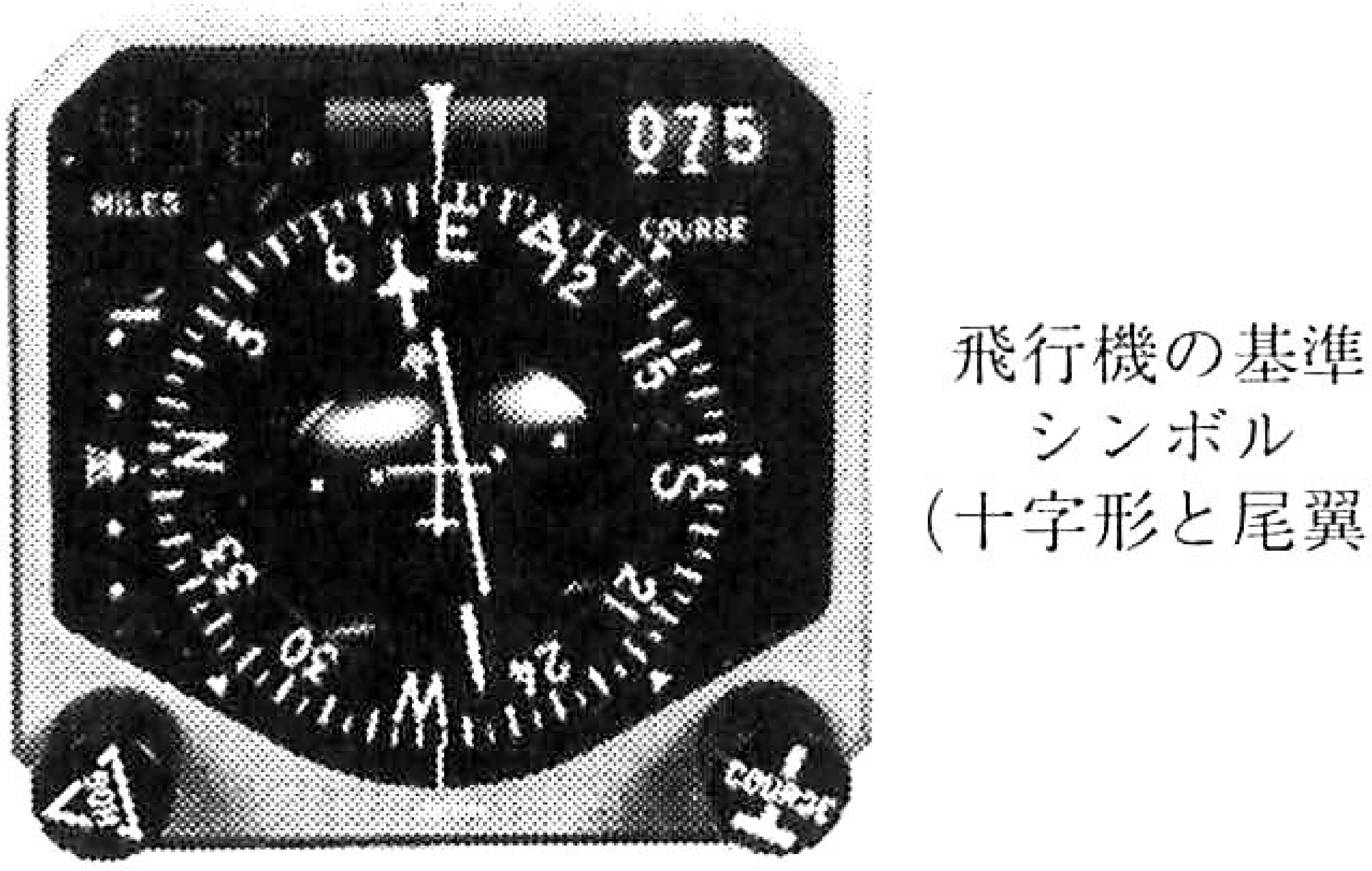
このようなパイロットの負担を軽減し、より正確な誘導制御を実現するため、ピッチとロールの操縦目標値を、一つのコントロール・コマンド（操縦命令）の形に組み合わせて表示するシステムが開発された。これがフライトディレクタである。

フライトディレクタは必要なバンク角やピッチ姿勢を表示する姿勢指示インジケータ（ＡＤＩ）と、自機の方位やＤＭＥ（距離計測装置）からの距離情報を与える水平状況インジケータ（ＨＳＩ）とから成る。その一例を図1―6に示す。

姿勢指示インジケータの画面の中心には、航空機のシンボル（横長の三角形）が固定した位置



a）姿勢指示インジケータ



b）水平状況インジケータ

図 1-6　フライトディレクタ

にあり、それに対して水平線は可動のバーで表示され、バンクすると傾く。操縦目標を表示するコマンドバーは、浅い逆V字形のシンボルである。パイロットは機体シンボルの三角形がコマンドバーのV字にはまり込むようにエルロンとエレベータを操舵すれば、誘導電波が指示した飛行経路上を飛ぶことができる。つ

まりパイロットは「Vの中に飛ぶ」ように誘導されるのである。

このように、フライトディレクタにはコンピュータが計算したピッチ角やバンク角の操縦目標値と、実際の姿勢角が一つの画面上に表示されている。ここまでくれば自動操縦はあと一歩である。なぜなら、この二つの信号の差をゼロにするような指令信号を、エレベータやラダーなどを駆動するアクチュエータに入力してやればよいからである。

ここまでが第一世代のオートパイロットとすれば、第二世代では次の項で述べるヨーダンパ、マッハトリムの導入が始まる。DC9、B737―100、および200などがこの世代の代表的な機種である。その後、DC10、L1011、A300などではオートパイロットに飛行コースを指示する航法システムが結合され、また自動着陸のためのフレアロジックなどの制御則が組み込まれた。

続く第三世代のオートパイロットには、グラスコックピットと呼ばれる飛行管理システム、横ナビゲーション（飛行コースのコントロール）と縦ナビゲーション（上下方向の飛行経路のコントロール）が導入された。また、オートスロットル（自動推力制御）システムによって、選択された自動操縦モードに対応する推力制限、ターゲット推力やスピード／マッハ数の維持などの機能をもつようになる。この高度の自動化の結果、パイロットの仕事はそれまでの四肢によって操縦することから、「プラン・ドウ・シー」（計画し、実行し、モニターすること）に変わってい

く。自動化の階層が分化して、機器の操作は下の階層のエージェント（機械とアクチュエータ）に任せ、パイロットは上部の階層の管理的な仕事に携わることになる。

この自動化の階層については、この章の後半で述べることとし、次にはどのような運航条件で自動操縦が必要かを見てみよう。

ウェザー・ミニマ

著者が九州の南の島に飛行機で行ったときのこと。運悪く台風が近くにあって雲底が地表近くまで下がっていた。飛行機は空港に進入を開始したが、滑走路はなかなか見えてこない。窓から下を見ていると、ときどき雲の切れ間から地面らしいものがのぞくが、すぐに雲がかかってしまう。そうするうちに飛行機は進入をやめて上昇し始めた。もう少し高度を下げれば滑走路が見えたかも知れないのに変だなと思っていると、機内放送が着陸できないのでもとの空港に引き返すという。乗客からは失望のどよめきが上がった。「またかよ!」と声に出した小父さんは地元の人らしく、いままでに何度もこういったことを経験しているのだろう。

このように、雲底が低いとき滑走路の位置や状況を目で見て確認するためには、雲底の下まで降下しなければならないが、地形の状況や障害物などのため安全に降下できる高度は、進入に使うルートごとに制限されている。したがって、パイロットがこの制限高度まで降下しても十分広

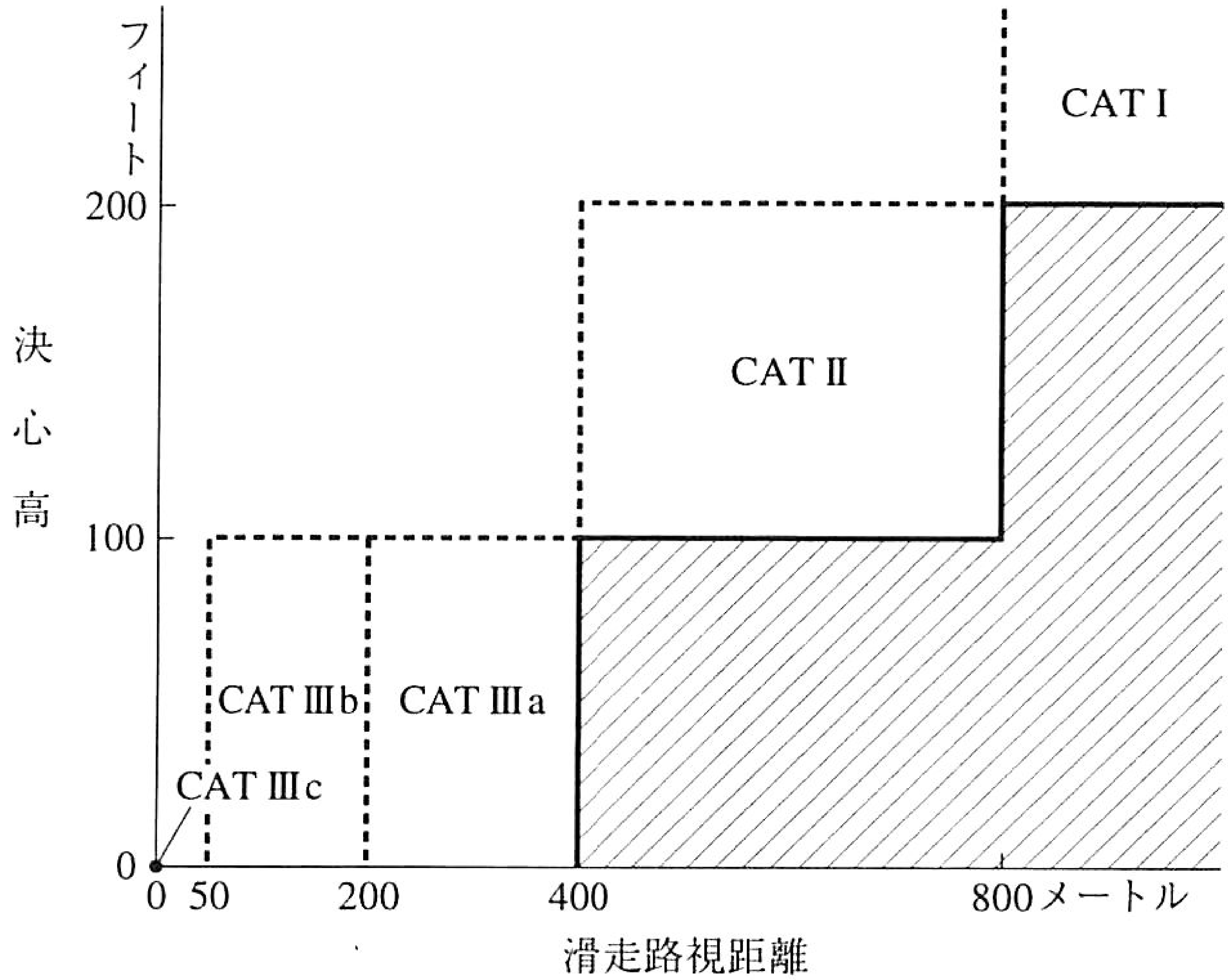


図 1–7　ICAOのウェザー・ミニマ

い範囲で滑走路灯などの地表の目標物が確認できなかったり、目標物が確認できたとしても航空機の位置が滑走路から近過ぎたり中心線からずれていて、安全に着陸できる見通しが立たなければ、着陸をやり直したり、代りの飛行場に行き先変更するためエンジン推力を増して上昇しなければならない。計器飛行方式で飛ぶ場合は、この決断を行う最低高度を決心高といい、電波高度計で測った高度で示される。

また、滑走路上で目視できる距離（滑走路視距離）が短いときは、それだけ着陸の困難度は増す。国際民間航空機関（ＩＣＡＯ）は着陸の運航条件を、視距離と決心高によって分類し、三つのカテゴリ（類別）に分けた（図１―７）。着陸の困難さの指

標である滑走路視距離はウェザー・ミニマと呼んでいる。

この図を見るとわかるように、視距離が八〇〇メートル以上で、決心高が二〇〇フィート（六〇メートル）とする運航条件をカテゴリIに分類する。カテゴリIIは滑走路視距離が四〇〇メートル以上あるとき決心高を一〇〇フィート（三〇メートル）とする運航条件である。現在、大型ジェット機を運航する定期航空会社は、たいていこのカテゴリIIの運航を国から認可されている。

カテゴリIIIa、IIIb、IIIcはいわゆる高カテゴリ着陸である。決心高の下限は特定されていないから、接地するまで降下したあとでも、着陸を断念して上昇することも含む。この着陸を視距離が二〇〇メートル以上の気象条件で行うのがカテゴリIIIaで、五〇メートル以上で行うのがカテゴリIIIbである。カテゴリIIIcともなると、滑走路上に目標物が見えないときでも着陸する完全な無視界着陸で、そのあとさらに誘導路上をゲートまでタクシー（自走）する。

滑走路視距離は航空気象の一要素に過ぎないから、これをウェザー・ミニマというと、全天候運航の条件と誤解されるかも知れない。実際、視距離が十分であっても、強い横風と乱気流（突風やウインドシア）、滑走路面の水溜りや雪氷などがあると、カテゴリIのときでも着陸は困難になる。

したがって、現在の規定類では滑走路視距離と決心高の組み合わせで決めた着陸のための最低運航条件を、「ランディング・ミニマ」と呼んでいる。

着陸進入の難易度は、気象条件以外に、地上の標識や照明、航法援助設備の有無とその性能、運用される機材に装備された航法機器、そして操縦する機長の経験と操縦技量にも関係する。各航空会社はこれらの条件を考慮して、さらにカンパニー・ミニマと呼ばれる機長資格を設けている。

わが国でカテゴリIIIの着陸が許されているのは成田と関西のほかは、とくに霧の多い釧路と熊本などの空港である。使用される機材も自動操縦システム（とくに飛行制御コンピュータ）が多重系になっていて、その一系統が突然故障しても自動着陸操縦が安全に継続できるハイテク機に限られている。

このように、今日のハイテク機は就航率の向上のため、旧世代機よりも困難な運航条件に対処するために高度な技術が使われ、それに伴ってパイロットにも高度な技量が要求されている。冒頭で行ったような、世代が違うジェット機の安全性を比較するときは、このような果たすべき任務の違いを考慮しないと意味がない。

自動着陸に向かって

定期旅客機が霧が深くて着陸できずに、目的地以外の空港へダイバート（目的地転換）しなければならないときは、乗客がこうむる不便は大きく、エアラインも損失をこうむる。この不利益を解消するため、すでに一九六〇年代に定期運航に自動着陸を導入しようと意欲的に動いた航空

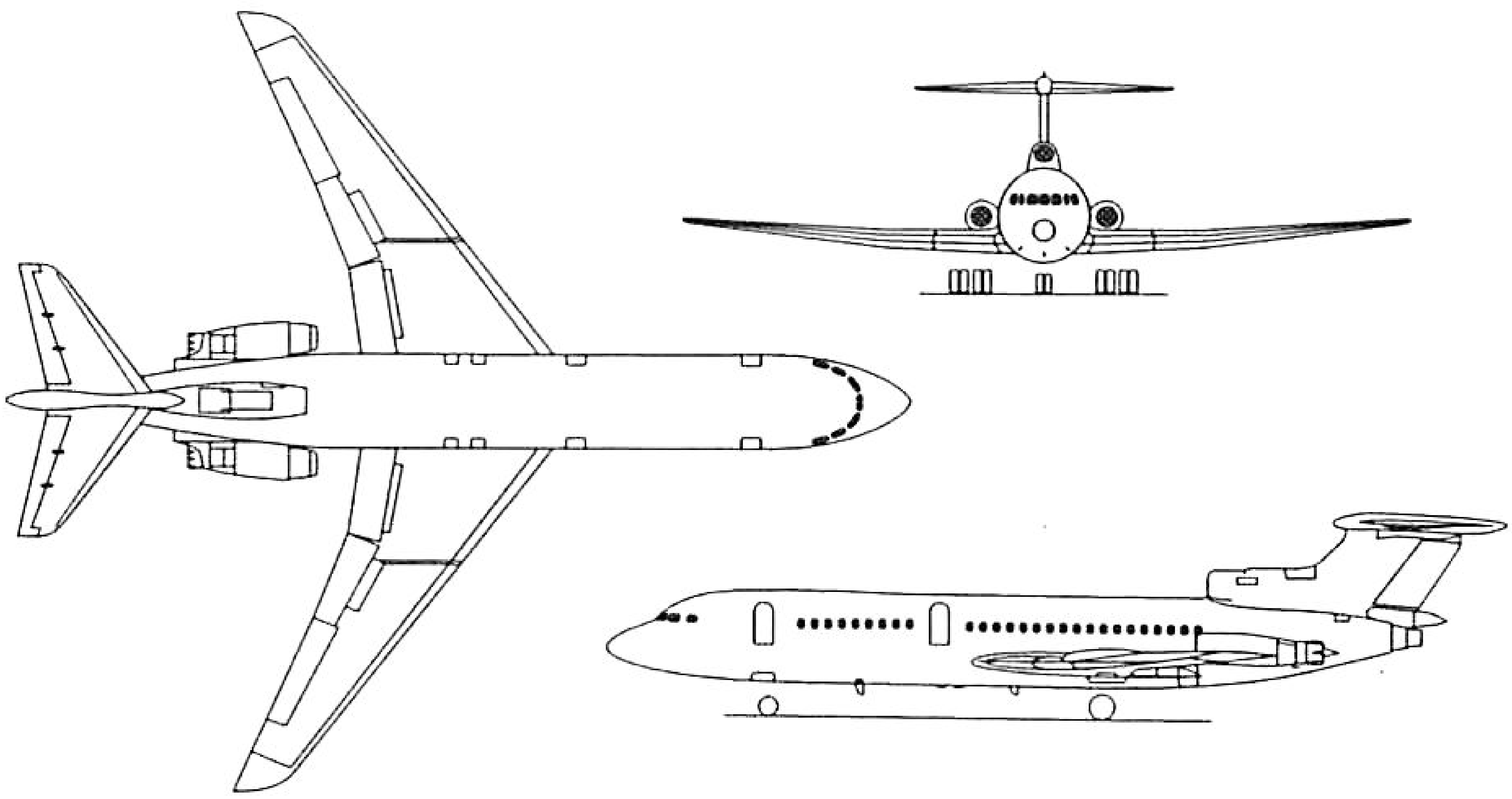


図 1-8　トライデント

会社が現れた。それは霧の多いロンドン空港をベースにしていた英国ヨーロッパ航空（いまの英国航空）である。著者がロンドン大学に留学していた一九六六年一二月二四日に、この航空会社のトライデント（図1―8）が、ヒースロー空港で、視程わずか一五〇フィート（四六メートル）の霧のなかで自動着陸を行った。トライデントが選ばれたのは、操縦系統を三重系にすることに対応してエンジンも三基搭載した航空機が適していると考えられたからである。パイロットは計器をモニターしただけだった。この試験飛行は約一〇年間続けられたが、客を乗せた営業運航はついに実現しなかった。時たま、定期便のジェット機が自動操縦で着陸を行い、あとで機長がそのことを機内にアナウンスするそうである。これは将来に備えて経験を蓄積するため、資格を持った機長が通常の気象条件下で模擬的にやっているのであるから、問題はない。

英国航空では、いまでも本拠地とするヒースロー空港で一九九〇年代後半に自動着陸を経常化するための準備を進めている。現用の航法援助設備では一〇〇メガヘルツ程度の比較的低周波を用いているので、建物や地形の影響を受け易く精度が悪い。そこで、今のＩＬＳをマイクロ波を使ったＭＬＳに代替する計画を進めている。一方、衛星を使って、地上からの支援を必要としない着陸方式の実用化も計画されている。

さてフライトディレクタによってパイロットに操縦ガイダンスを与えるだけにとどまらず、さらに高度の自動化が追求されているのは、なぜであろうか。それは、人間パイロットでは実行不能なある種のマヌーバ（運動するための操舵）が、機械ならできるからである。例えば、いま述べた霧の中の着陸のように視覚からでは手がかりが得られないとき、また非常に長い時間集中力が要求される操縦などがそうである。ここで、希望する飛行経路の上に高い精度で機体を保持しなければならない着陸進入を行う場合をもう一度考えてみよう。

着陸の基本条件

自動であろうとパイロットの操縦であろうと、着陸するとき要求される機体の運動には変わりはない。それは次のような条件を満たさなければならない（図１—９）。

（１）脚の接地が快適に行われること

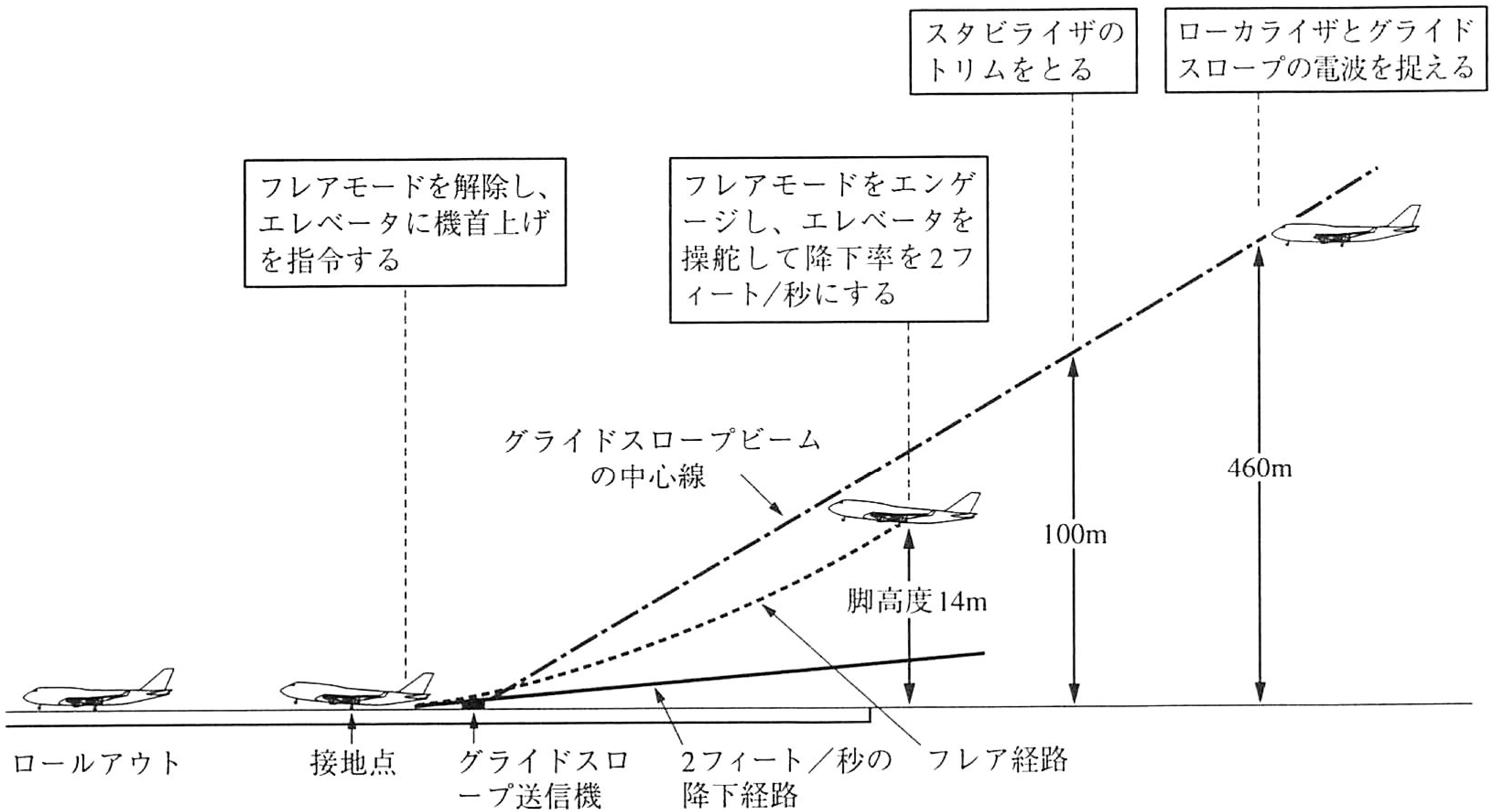


図 1-9　自動着陸（A 320 の場合）

（2）降下率は最適な二フィート／秒（〇・六メートル／秒）を超えないこと
（3）接地まで、エンジン推力を連続的に減らすことによって、基準速度V_{REF}（失速速度V_sの一・三倍）以下まで減速する
（4）着陸前に翼を水平にする
（5）横風があるときは、風上側に向けていた機首を滑走路中心線にそろえるデクラブ（図1－10）という運動をする

このことからわかるように、着陸はピッチ、ロール、ヨーの三軸まわりの姿勢制御とエンジン推力による速度制御を同時に行う、パイロットに要求される最もむずかしい操縦であるといえる。

さて機体の位置や姿勢にずれがあればそれを修正しなければならないが、人間は計器上でピッチ姿勢の一度のずれに気付くのに〇・三秒かかる。その後、操縦桿に加えるべき修正量を決めて操舵を実行するまでに〇・五秒かかる。自動操縦はもっと速くそれができる。〇・一度のピッチ角のずれを〇・〇〇五秒で検出し、〇・一秒以内にそれを抑える信号を入力する。つまり、機械は人間より一〇分の一も小さい角度誤差を検出して、七分の一以下の時間遅れで修正操作を開始する。

このように応答の速さと正確さだけを見て機械と人間を比べるなら、機械の優位は明らかである。しかも、このマヌーバは国内線では頻繁に繰り返し行われ、多数の飛行パラメータを同時に

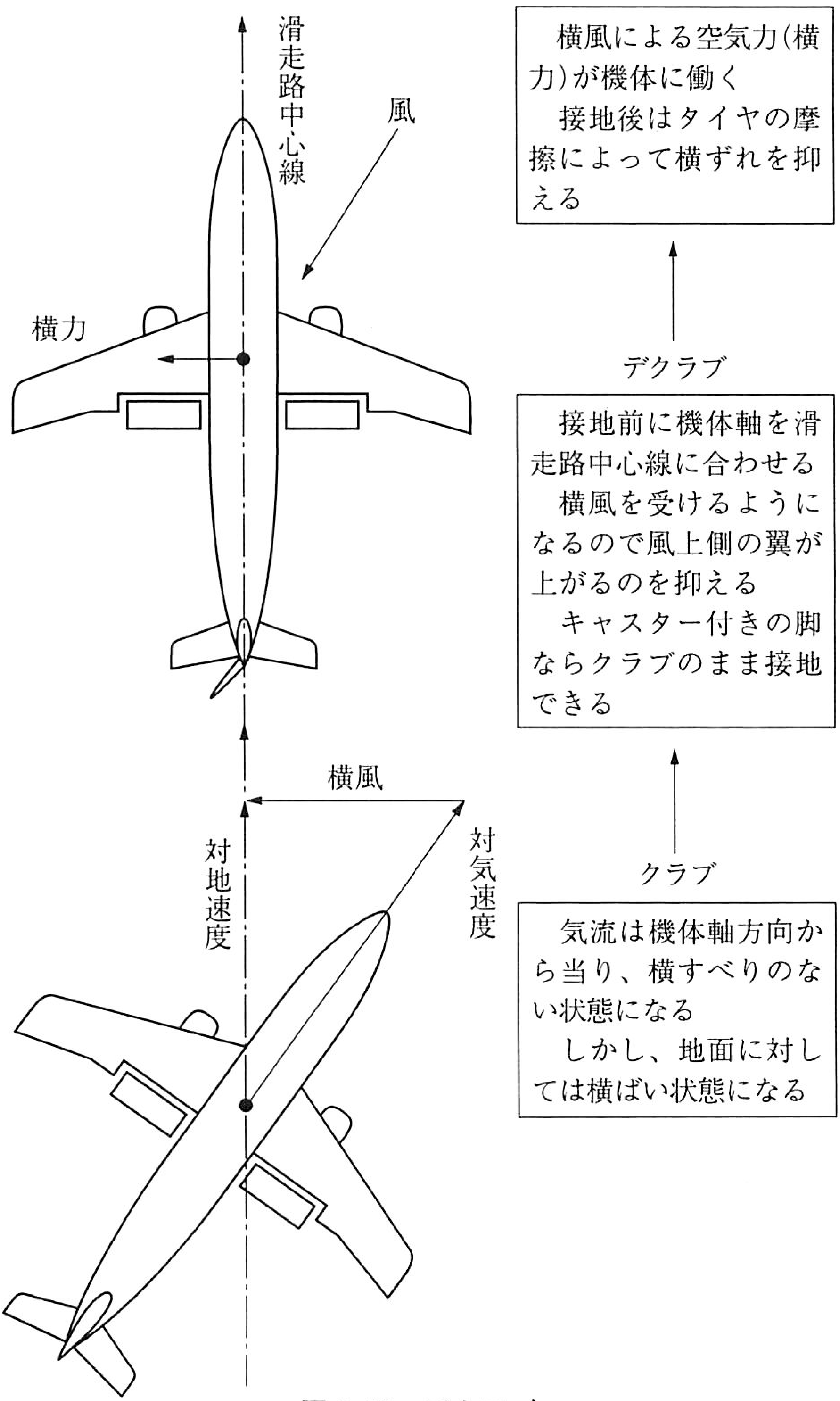

滑走路中心線
風
横力
横風による空気力(横力)が機体に働く
接地後はタイヤの摩擦によって横ずれを抑える
デクラブ
接地前に機体軸を滑走路中心線に合わせる
横風を受けるようになるので風上側の翼が上がるのを抑える
キャスター付きの脚ならクラブのまま接地できる
横風
対地速度
対気速度
クラブ
気流は機体軸方向から当り、横すべりのない状態になる
しかし、地面に対しては横ばい状態になる

図 1-10　デクラブ

処理するものであるから、これを自動化することのメリットは大きい。この利点を最大限に追求しようとして、いわゆる「技術中心の自動化」が進められ、今日に至ったのである。

フライ・バイ・ワイア

本格的な自動飛行システムでは、大量の航法データを高性能のコンピュータを使って処理する必要があるが、これは一九八〇年代に開発されたフライ・バイ・ワイアの技術によってはじめて可能になった。

フライ・バイ・ワイアとは「ワイア（電線）を通して操縦する」という意味である。パイロットの操舵入力は従来のようにケーブル（操縦索）によって舵面に伝えられるのではなく、電気信号に変えられたあと、電線を通して舵の駆動機構（アクチュエータ）に伝えられる。

しかし単に電線とかケーブルとかいう信号の伝達手段の違いよりも、それが電気信号によって伝達されることで、コンピュータのすぐれた情報処理能力が機上で利用できるようになったことに大きな意義がある。操舵力を伝えるための連結機構が不要になって、重量が軽くできたのは二次的な効果である。

フランスと英国が共同開発し一九六九年に初飛行した超音速旅客機コンコルドでは、早くも操縦系統にアナログ式（電圧の変化によって信号を伝える）のフライ・バイ・ワイアを採用し、自

動操縦機能を実用化した（表1―1　69ページ）。軍用機ではフランスのミラージュ2000／4000や米軍のF16でもアナログ式のフライ・バイ・ワイアが使われた。

しかし、アナログ方式では記憶し処理できる情報の量に限界があった。その後、大規模集積回路（LSI）を使って小型・軽量化が進んだ結果、高性能で大容量の搭載型コンピュータが開発されると、デジタル信号を使って大量の情報を伝え、記憶し、高速で処理するデジタル・フライ・バイ・ワイアの技術が開発された。戦闘機F18や実験機X29、そして開発中のF22型戦闘機ではこのデジタル・フライ・バイ・ワイアが採用されている。

フライ・バイ・ワイアの特徴は次の四点に要約できる。

(一) 大量の情報を処理できる
(二) 大量のデータを蓄えることができる
(三) 論理操作と抽象化
(四) タスクの階層化

この技術を駆使した自動操縦システムが、どのように優れた航空機を生み出し、逆にどのような問題を引き起こしたかについて、以下で説明する。

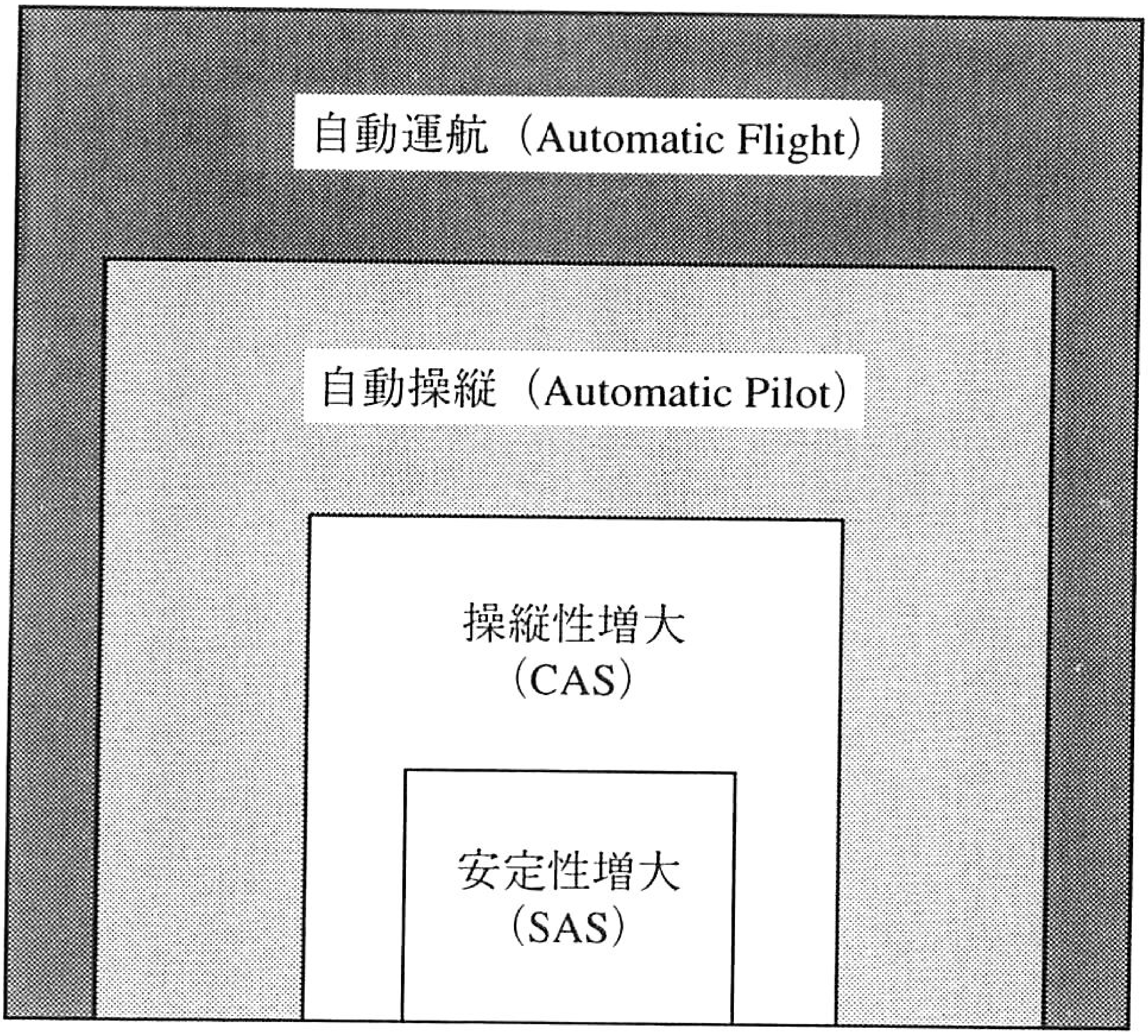


図 1-11　自動飛行システムの階層

自動操縦の階層

自動操縦というとパイロットは全く何もしないというように誤解されやすいが、そうではない。手を動かさないときでもパイロットは飛行状態を常に監視していて、必要なら操縦を自分の手にとり戻す。このようなパイロットの関わり方に対応して、自動操縦にはいくつかの階層がある。図1―11はこの階層を図で示したもので、最下層の安定性増大から最上層の自動運航までの間に、いくつかの中間的階層がある。パイロットの関わり方は、階層によって性格が異なる。この階層を下から順に説明しよう。

安定性増大

自動化の底辺にあるのは安定性増大の機能で、主なものはヨーダンパと自動トリムである。ヨーダンパはダッチロールという横方向の機体のふらつき運動を抑える機能を果たす。ダッチロールはロール、ヨー、横滑りの三つの自由度で、運動が複雑に絡みあっている（図1―12）。特に低速では垂直尾翼に働く空力的な減衰力が弱くなるので、この運動は減衰しにくくなる。すなわち最も精密な操縦が要求される着陸進入段階で、このダッチロール運動が起こりやすい。このことは、パイロットを非常に悩ませる。なぜなら、それを抑えようとして下手に操舵すると、この振動をかえって増幅してしまうからである。このようなパイロットの操舵が原因となって誘起される振動はＰＩＯ（Pilot-Induced Oscillation）と呼ばれる。

この振動的運動（ダッチロール）を抑えるには、ヨーの変化率を検出するレートジャイロと横滑りを検出する横方向加速度計の出力信号から、振動を減衰させるために必要なラダー操舵量を計算し、これをラダー駆動アクチュエータに入力してやる。こうすれば、本来ダッチロールで不安定になりやすい性質をもった機体でも、人工的に安定させることができる。この機能をピッチ、ロール、ヨーの機体の三軸まわりの運動について実行するのが、安定性増大システム（ＳＡＳ：Stability Augmentation System）である。

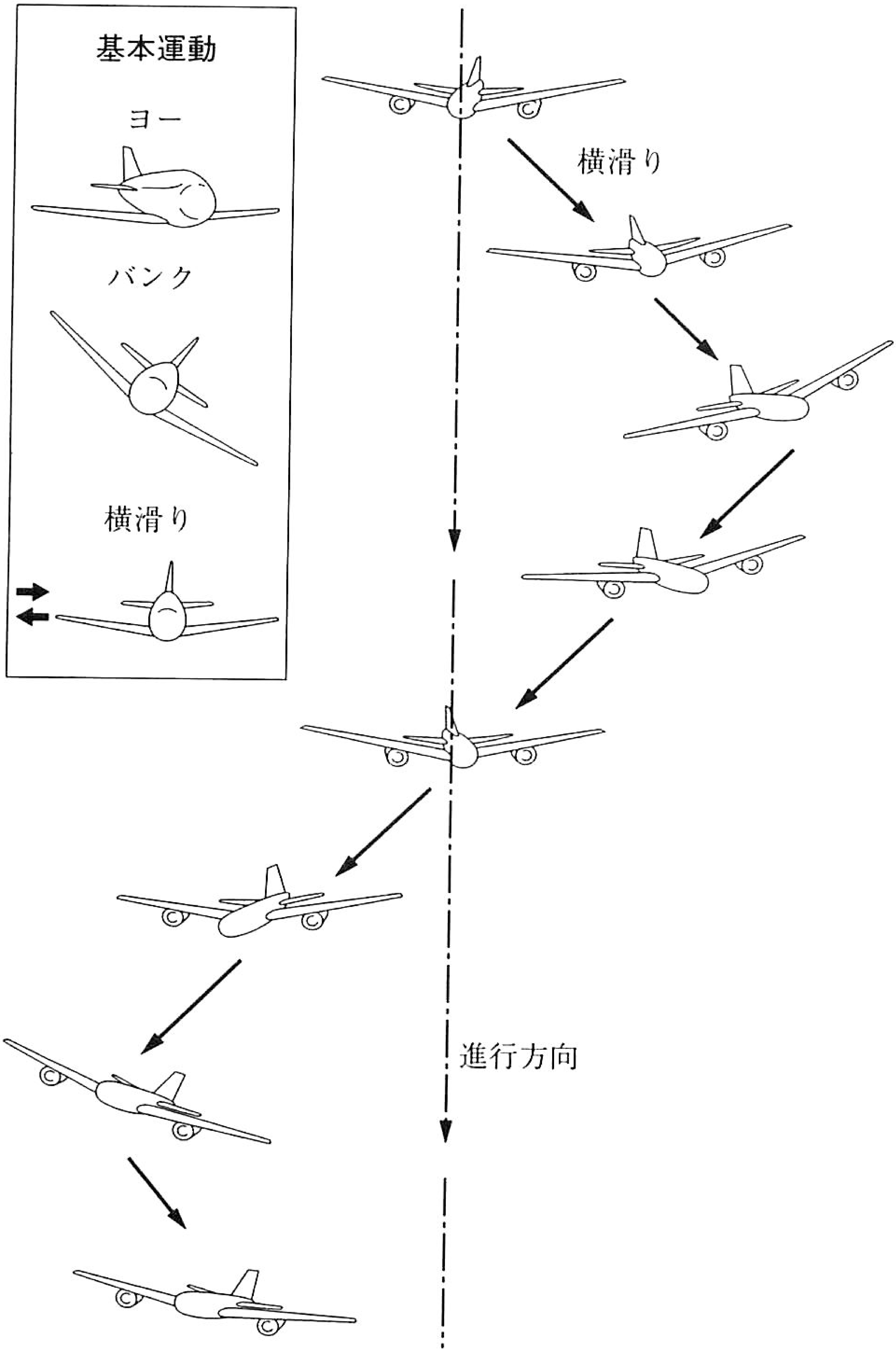


図 1-12　ダッチロール

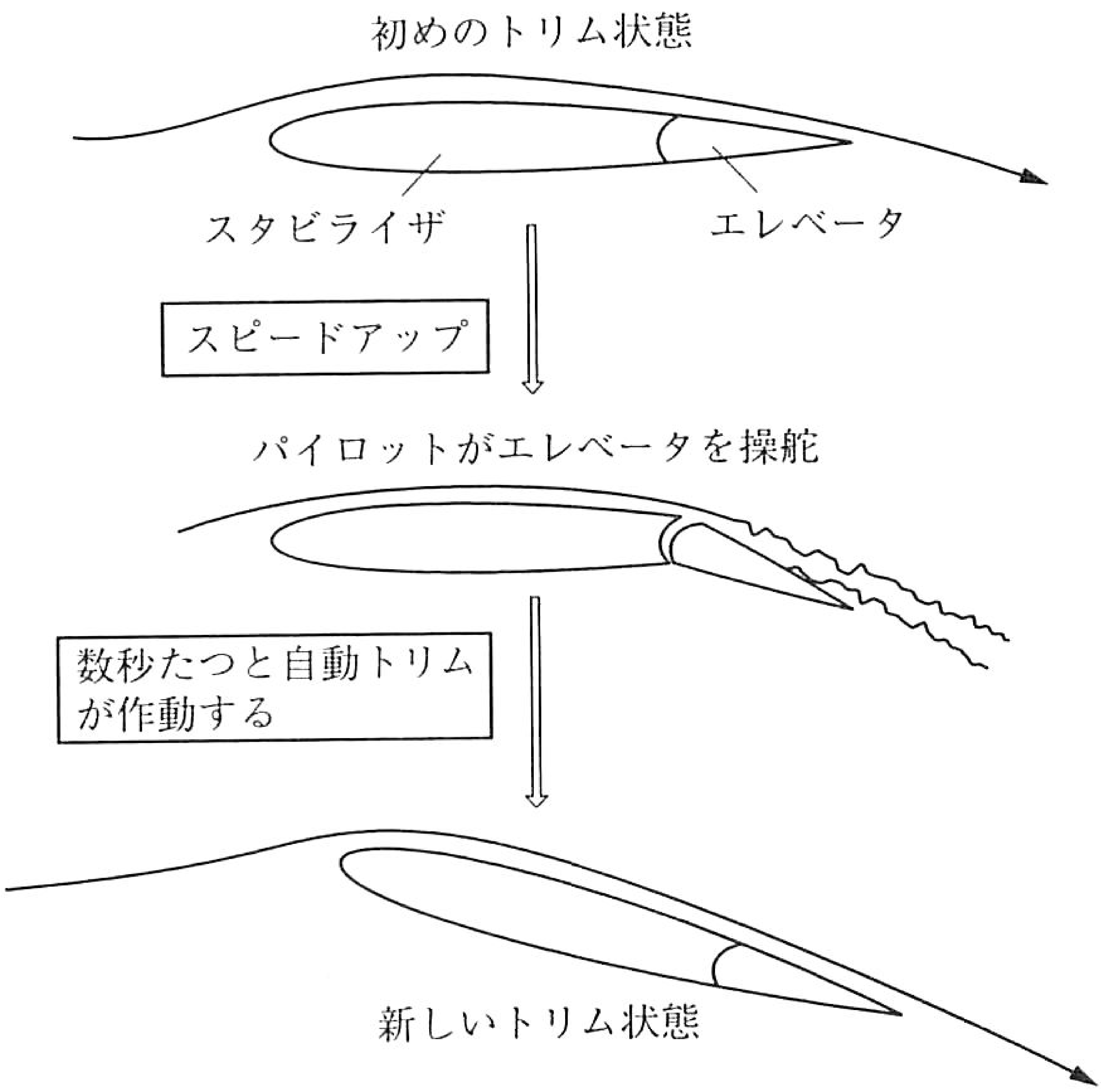


図 1-13　自動トリム（スピードアップの場合）

次に安定性増大の第二の機能である自動トリムについて説明する。世間で「トリム体操」というのがあるが、これは身体についた「余分な脂肪」を取り除くための体操である。自動操縦では「トリム」とは「余分な保舵力」を取り除くことである。保舵力とは、あるピッチ姿勢を維持して飛ぶために、パイロットが操縦桿に加えなければならない力のことである。例えば、あるピッチ姿勢でバランスがとれているとき、速度を増すと機首上げ傾向が出てくる。これは機体のもつ固有の静安定性のため（主として水平尾翼の働き）である。そのとき、パイロットはこの機

首上げ傾向を抑制するため操縦桿を前方に押し続けなければならない。このとき自動トリムが活きていると、数秒程度の時間が経つとスタビライザが自動的に機首下げ側に傾けられ、エレベータが中立位置に戻った状態でバランスがとり直されるから、パイロットが操縦桿から力を抜いても、新しい速度で「トリム状態」が保たれる。これをスピードトリムという（図1―13）。

ある機種では、パイロットが自動トリムにオーバラップさせてエレベータを操舵することができる。そのとき、エレベータとスタビライザが折れ曲がって水平尾翼全体が「への字」や「逆への字」の形になるおそれがある。それが極端な形になると、空気の流れが剝がれて尾翼が失速したり、機体がトリム状態から外れて不安定状態に陥る危険がある。このことは前著『飛行機はなぜ落ちるか』のなかの尾翼着氷の項でも説明した。自動トリムは、このように水平尾翼の形が「への字」にならないよう、常に流線形に保つ機能でもある。自動トリムによってへの字形が解消されると同時に、パイロットの保舵力（スティックをある位置に保持するため手から加える力）も不用になる。実際はエレベータの中立位置を微妙にシフトさせて、水平尾翼全体として適当な反りをもった流線形にする。図1―14には両者の角度関係と、そのときの水平尾翼全体の断面形（翼型）を示した。この図ではスタビライザの位置はユニットという量で示されている。

これとは別に、マッハトリムという機能がある。これは、飛行マッハ数が〇・七程度を超すと空気の圧縮性が現れて、翼の上面（尾翼では下面）に衝撃波が発生して翼表面の圧力分布が変わ

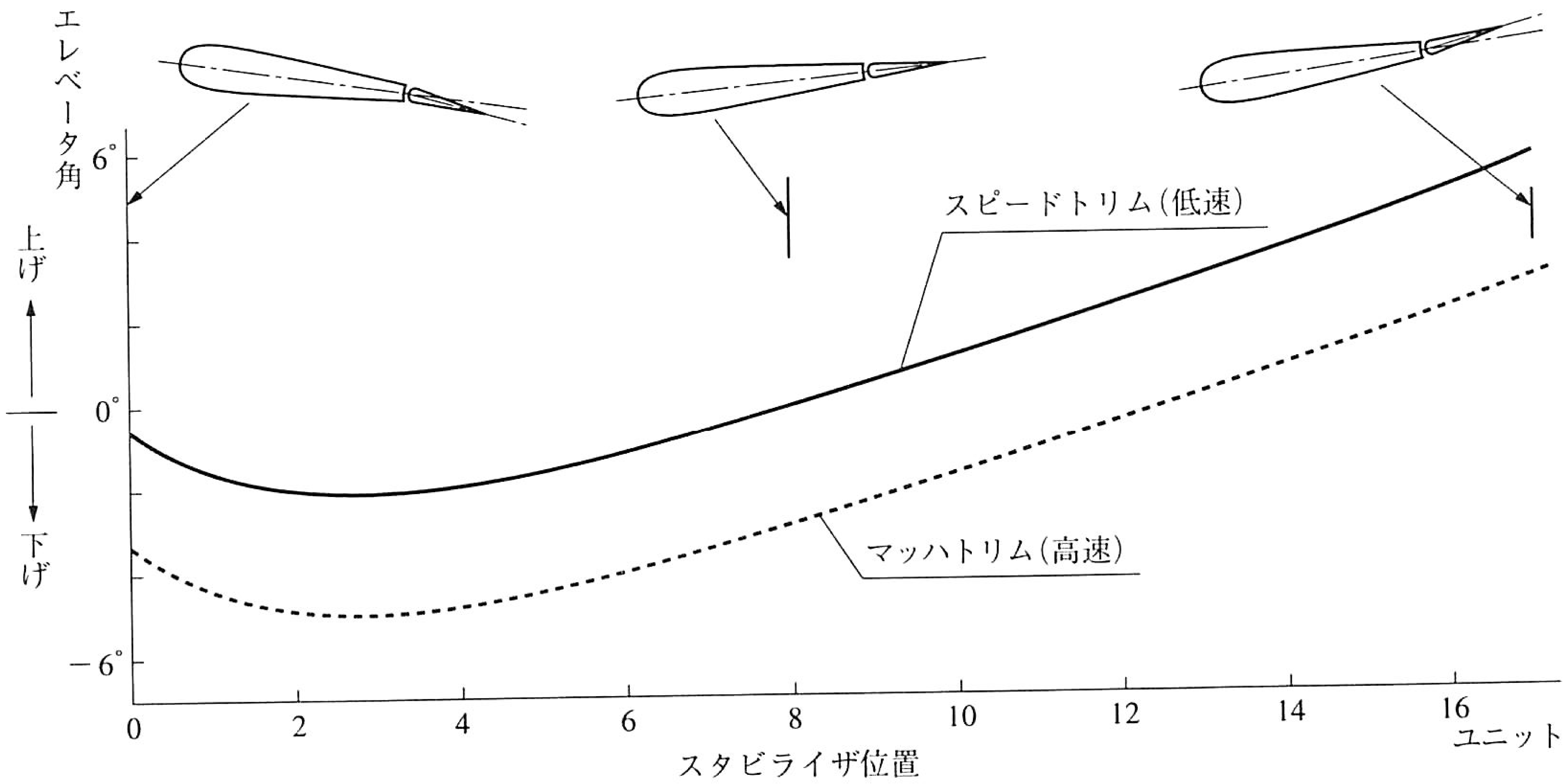


図 1-14　スタビライザトリム（エレベータ中立位置の自動シフト）

るため、揚力の作用点が後退しそのため機首下げが起こる。このタックアンダという現象による機体の不安定化を防ぐため、スタビライザの角度を自動的に調整するのがマッハトリムである。

操縦性増大

前項で述べた安定性増大システムでは、角度や速度の検出からその信号処理、舵面駆動用アクチュエータへの入力までが機械系の内部で処理されるから、その制御ループの外にいるパイロットから見れば、優れた固有安定性をもつ機体に乗っているのと同じである。しかし、安定性増大の上に来る操縦性増大システム（CAS：Controlability Augmentation System）では、パイロットは制御ループのなかに組み込まれる。

ではパイロットはどのようにシステムに組み込まれているのであろうか。

航空機はパイロットと航空機が構成する人間―機械系であり、従来から図1―15の上半部分の人間―機械系のループで表されてきた。自動操縦を含めると、さらに図の下半部に示すような飛行管理システムを追加して考えなければならない。飛行管理システムは内部ループと外部ループとで構成される。この二つのループとは何かを、次に説明しよう。

航空機の制御系に与えられる計器情報には、内部パラメータと外部パラメータの二種がある。内部パラメータは、エレベータ、エルロン、ラダー、スポイラなどの角度や、エンジンの回転数

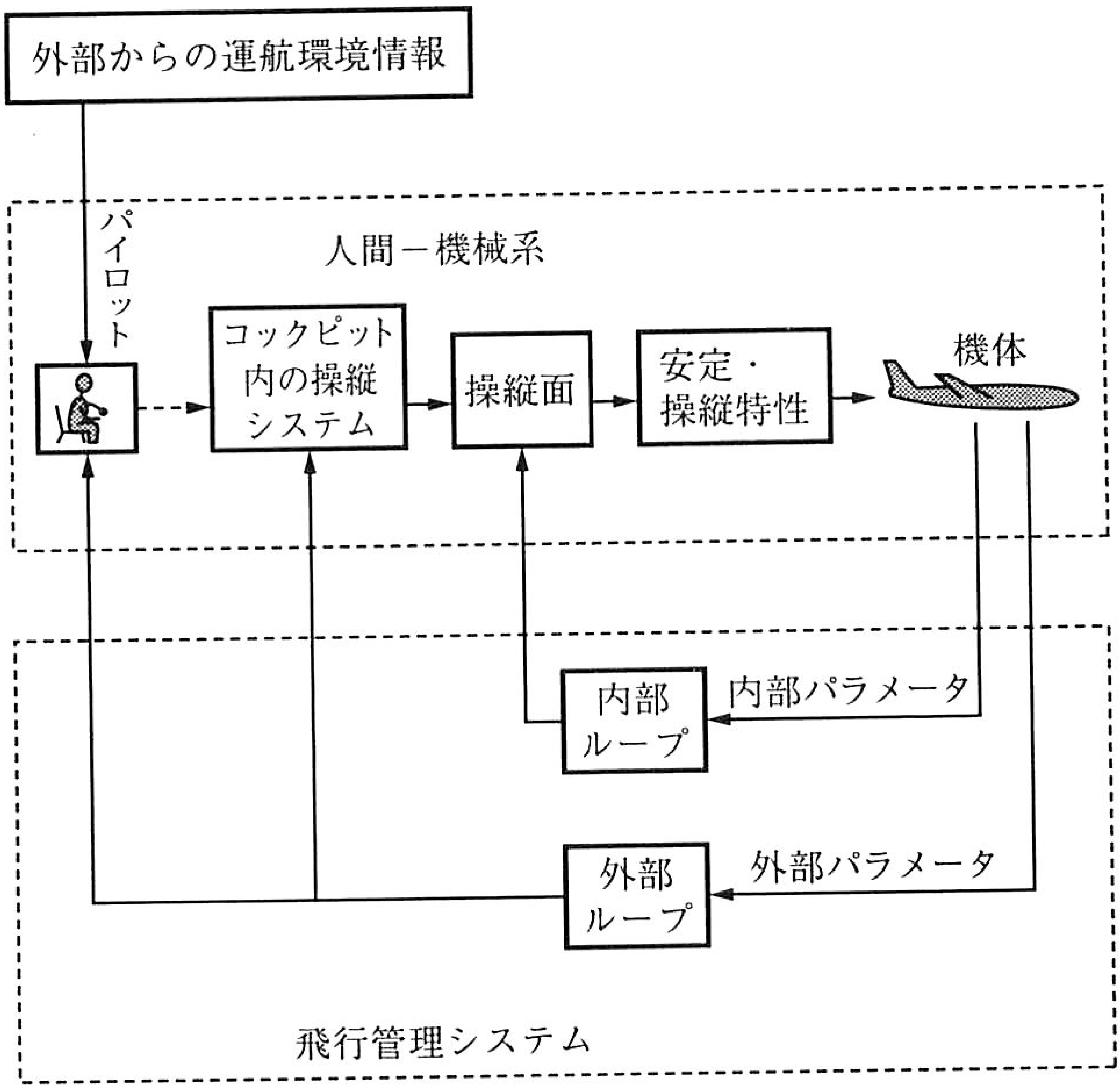


図 1-15　人間―機械系と飛行管理システム

や燃焼ガス温度などの機体の各システムの作動状態を表す物理量と、ピッチやロールなどの姿勢角である。これらを飛行制御コンピュータに入力して処理し、操舵機構に入力するループが内部ループである。

しかし、内部パラメータだけでは、機体がどのような運動をしているかがわからない。それがわかるためには、外部空間のなかで

の航空機の運動に関するデータがなければならない。このデータはピトー管、気圧高度計、コンパスあるいはジャイロなどの航法計器から得られる。これらのパラメータが外部パラメータである。外部パラメータを航法コンピュータに入力するループが外部ループである。飛行管理システムの中での内部、および外部ループをもっと具体的に書いたのが図1—16である。

図1—15にもあるように、パイロットはこの外部ループに介入して、飛行をコントロールする。

前項の安定性増大（SAS）の機能は、例えば乱気流のなかで精密進入を行うときに、機体の飛行経路と姿勢を保つのには役立つが、その反面、外部ループに属するパイロットが機体姿勢を変えようとして操舵するとき、この自動化システムは操舵入力を外乱とみなしてそれに逆らうから、舵の効きを鈍くする。それではマヌーバする立場からは都合が悪いので、パイロットの操舵の効果を増強して、パイロットの意図する運動を確実に達成するために補足的な操舵を行うのが、操縦性増大システム（CAS）の働きである。

具体的には、例えば、ロールコントロール用のノブがあって、それがデテント位置（回り止めの爪がひっかかる中立の位置）にあると、ロールについて前に述べた安定性増大機能が働いて操舵の効果が減殺される。これに対し、ノブをデテント位置からずらすと、安定化のためのフィードバック入力は遮断され、機体はノブの回転量に比例したバンク角をとって、旋回に入る。この

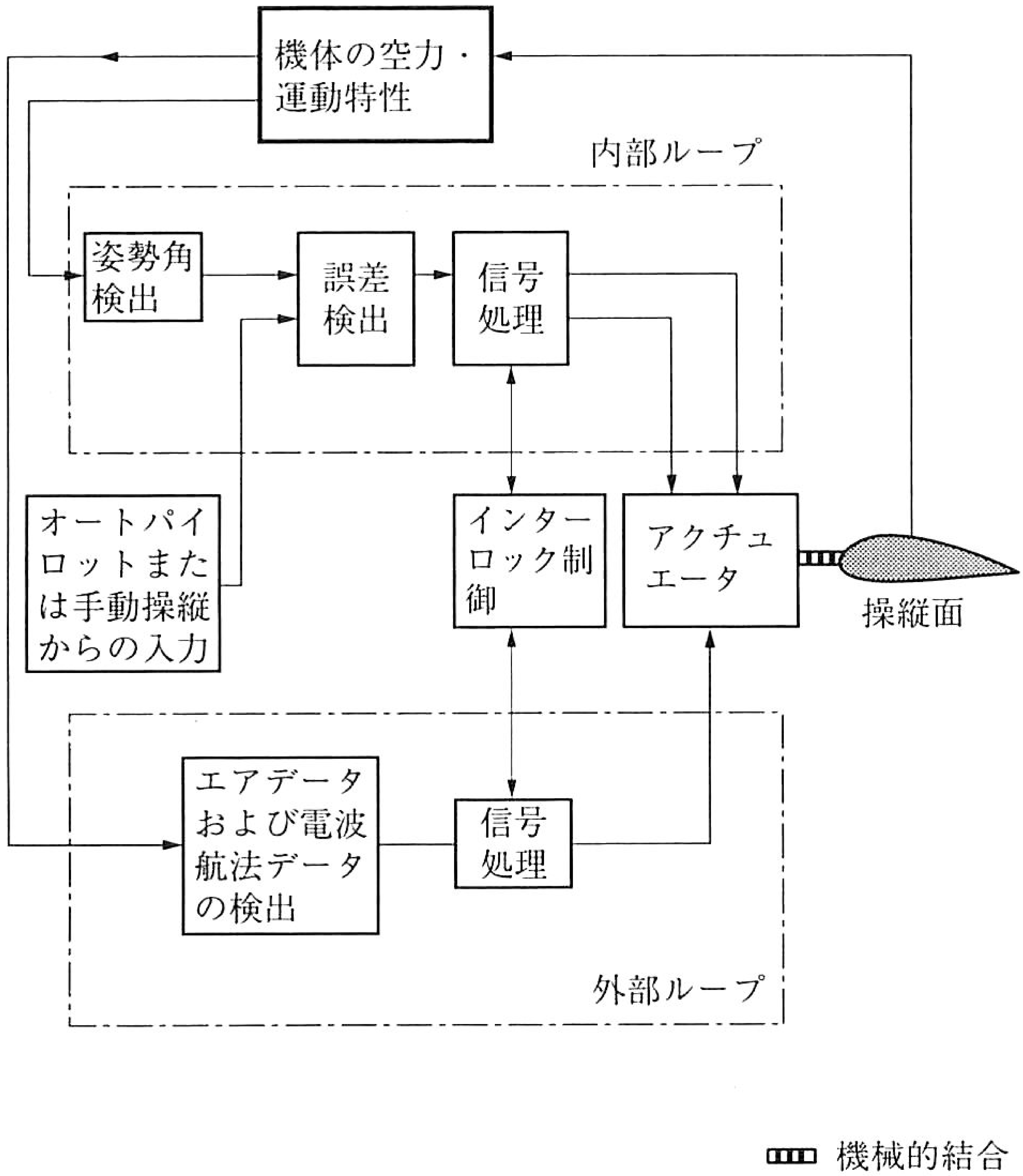


図 1-16　内部ループと外部ループ

ときのパイロットの指令信号は、直接、サーボ・アクチュエータに入力される。これはフィード・バック制御に対して、フィード・フォワード制御といわれるものである。

パイロットの操縦能力を増大させる機能の他の例は、旋回コーディネーションと揚力補償である。旋回するためにバンクすると、垂直上向きに作用していた揚力が傾いて、その

水平方向成分が求心力となり円運動に入るのが旋回の始まりである。バンク角が小さ過ぎると遠心力が求心力より大きくなって、機体は外側に横滑りする（外滑り）。逆にバンク角が大き過ぎると、求心力が勝って内滑りする。横滑りは旋回には不要で有害な運動であるから、ラダーを操舵してこれを抑えなければならない。

また、ロールすると一般にはアドバース・ヨーが起こる（図1―17）。これは、エルロンを操舵すると左右の翼に作用する抗力がアンバランスになり、この力の差が機首を旋回とは逆方向に向けようとする性質である。この逆効果を抑えるために、パイロットはラダーを操舵して積極的に旋回方向に機首を向けなければならない。

バンクすると揚力ベクトルが傾き、その上向き成分は重量を支えるには足りなくなるから、ピッチ角を増して揚力を増さなければならない。これを揚力補償という（図1―18）。

このように、横滑りがなく一定高度を維持した旋回をするためには、エルロン、ラダー、エレベータの三つの舵を調和させて操舵しなければならない。操縦性増大装置はパイロットがこの「整合された旋回」を行うのを助ける。

コントロール・ループから外れるパイロット

この自動化の階層までは、パイロットはコントロール・ループに入っており、操縦の権限（オ

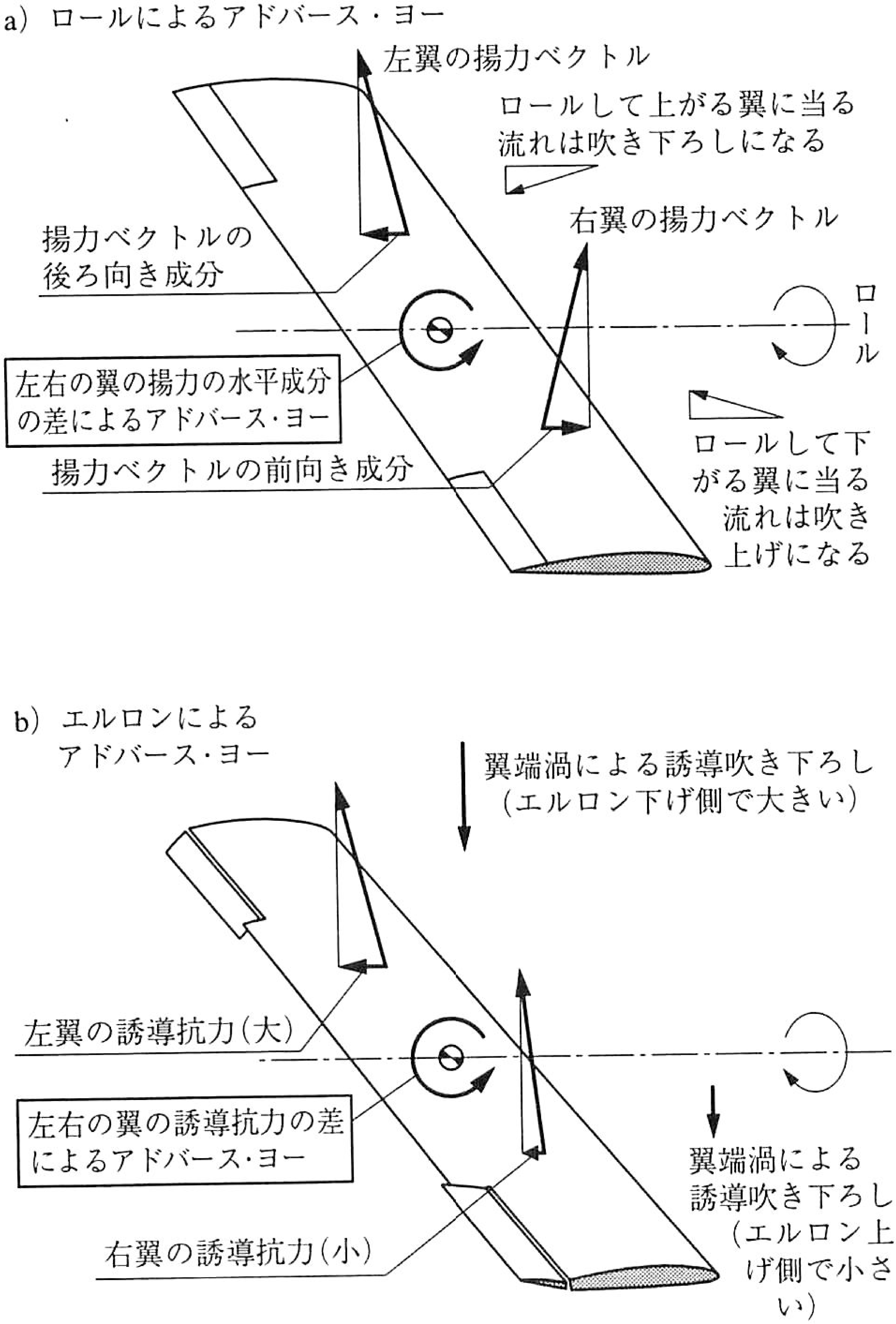


図 1-17　アドバース・ヨー

ーソリティ）は一〇〇パーセント、パイロットにある（図1―11）。したがって、パイロットからすると、安定性と操縦性が向上した航空機に乗っているのと同じである。しかし、その上の階層であるオートパイロット（Automatic Pilot＝自動操縦）になると、操縦の性格が変わる。それまでパイロットが主体的に行ってきた速度と高度の維持と変更、およびそのための機体姿勢と推力のコントロールは、自動操縦システムが行う。パイロットの操舵入力は直接には舵面に伝わらず、まず飛行管理コンピュータがそれを処理して、指令信号にして操縦面の駆動装置に入力する。パイロットは、外部条件（対気速度、高度、方位）を選択してコンピュータに入力したあとは、自動操縦システムの作動をモニターするだけである。

　さらに最上階のオートフライト（Automatic Flight＝自動運航）は、巡航高度への上昇、巡航、および、降下の段階での飛行管理と、ターミ

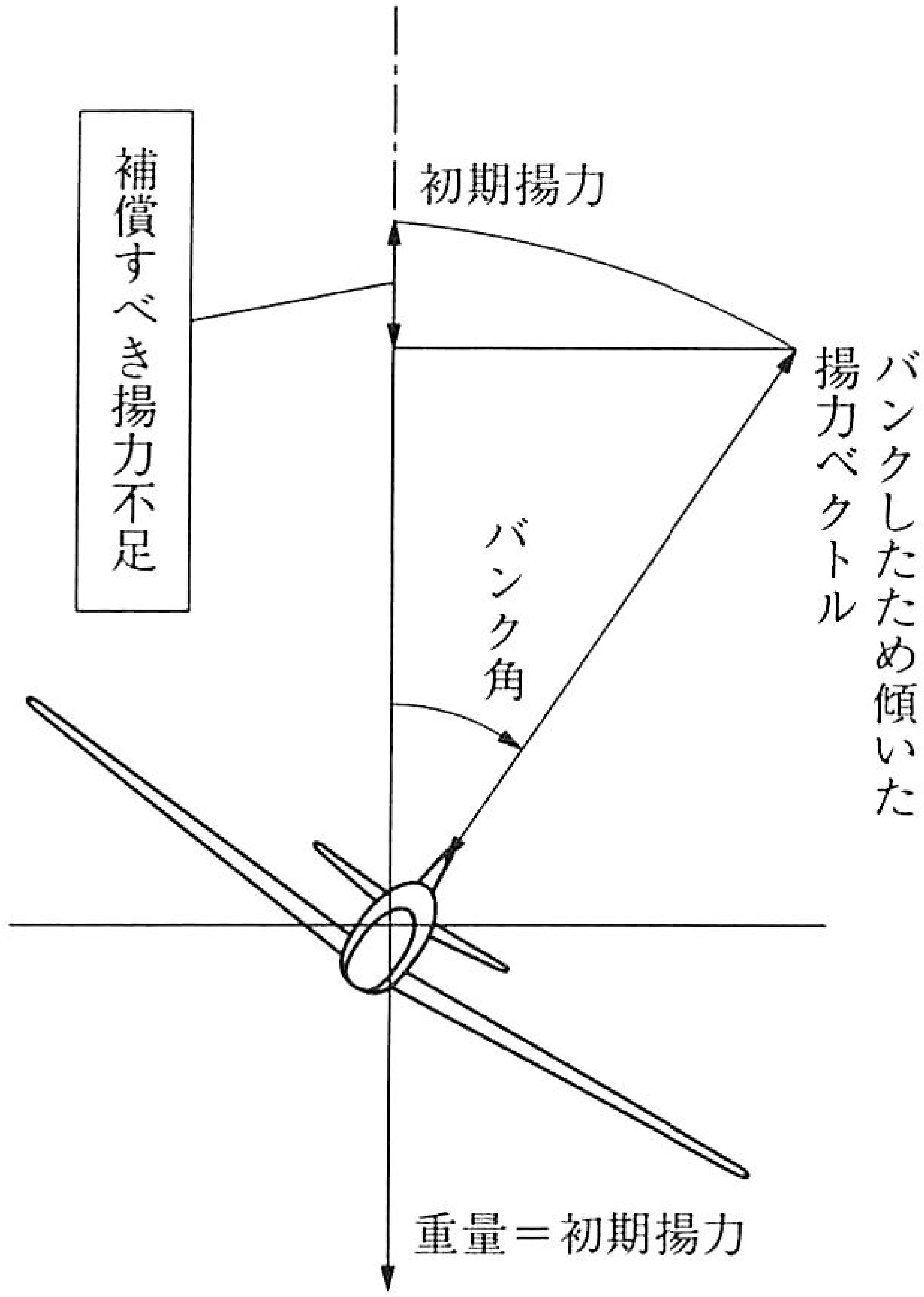


図 1-18　揚力補償

ナル空域におけるＩＬＳ進入、フレア、着陸などのマヌーバを自動的に行うシステムである。

オートパイロット以上の階層ではパイロットのオーソリティ（権限）は制限され、代わりにコンピュータがオーソリティを持つようになる。実際の運航では行われてはいないが、完全な手放し着陸では、自動操縦システムのオーソリティが一〇〇パーセントになる。そのときは、図1―15のなかで破線で描いたパイロットからの入力回路は切れる。つまり、パイロットはコントロール・ループからは完全に外れるのだ。

ナビゲーションの自動化

カー・ナビゲーションという言葉が一般に使われているが、ナビゲーションとは船が出港したあと決められた航路をたどって目的港に達する船舶の航法からきた言葉である。車の場合は、交通規則と道路標識に従い、迷わず、コースを外れず、交差点を正しく曲がり、安全に（衝突せず）走行しなければならない。

地上を走る場合は運動は基本的には平面的なので、横方向のナビゲーションだけで済むが、航空機の場合には、そのほかに垂直プロフィル（垂直面内の経路）に沿って上昇、下降するという垂直方向のナビゲーションが加わる。この垂直ナビゲーションは地上から出発し、またそこに帰らなければならない飛行機にとっては、避けることができないミッションである。

ゼロ戦の英雄である坂井三郎氏の表現では、「着陸は……空中を飛んでいたものが、ふたたび地球と縁をつなぐ操作であるだけに、細かい神経を最大限に使わなければ危険である」（『続・大空のサムライ』光人社刊）。この垂直ナビゲーションの自動化が運航にさまざまな難しい問題を持ち込んだ。

その前に、まず横方向のナビゲーションを考えてみよう。

現代の航空機は、自機の位置と方位を求めるために慣性航法システム（ＩＮＳ）を使う。慣性ジャイロと加速度計を心臓部とするこのシステムは、まず軍用技術として発達した。軍用機が敵地で行動するときは、地上の航法支援施設からの電波情報はまったく期待できないから、自蔵の慣性航法装置を頼りにするしかない。そのため、軍は慣性航法の運用経験を積み重ね、その技術を成熟させた。これが民間に転用され、ジェット旅客機が長距離を決められた航路に沿って飛ぶとき、運航の信頼性を高めパイロットのワークロードを軽減するのに役立った。現在では回転式のジャイロではなく、光ファイバーを用いたリング・レーザー・ジャイロが主流になっている。また、従来のＩＮＳに対して、さらに進んだ慣性システムを慣性基準システム（ＩＲＳ：Inertial Reference System）と呼んでいる。

位置や方位はこのジャイロと加速度計の出力を積分して得られるが、従来パイロットはそれを使い、また地上の無線標識施設（最近では人工衛星）からの信号電波を受けて、自機の位置と飛

行経路を確かめながら目的空港まで飛行してきた。ナビゲーションの自動化は、この機能をコンピュータに代行させることである。この段階まで来ると、航空機の自動化はもはやオートパイロットというよりはオートフライトと呼ぶのが適当である。自動飛行システムは機体の高度、位置、速度などの外部条件と呼ばれるパラメータを処理する。すなわち、自動飛行システムは典型的な外部ループ装置である。

一九七〇年代に入ると、ジェット旅客機には自動航法システムが装備され始めた。ダグラス社が開発したDC10型機も、慣性航法センサ／航法コンピュータから構成された飛行誘導システムを二系統持っている。この航法コンピュータに出発点と目的地、途中のウェイポイント（通過点）の緯度・経度を入力しておくと、離陸後の上昇、巡航、カテゴリIIIまでの着陸、ゴーアラウンド（着陸進入のやり直し）の各飛行段階を自動飛行できるように設計されている。

エアバスインダストリの挑戦

ヨーロッパ諸国では、戦後圧倒的な優位を誇っていた米国の航空機メーカに対抗して商用輸送機を生産するため、一九七〇年一二月にフランスのエアロスパシアル、ドイツのメッサシュミット・ベルコウ・ブロム、およびオランダのフォッカーの三社を母胎とする国際合弁企業が創設された。この合併のリーダ役を務めたのが、フランスの航空機メーカのテストパイロット出身のア

ンリ・ジーグラーで、これから本書のなかでしばしば登場する。次の年にはスペインの航空機製造会社CASAと英国のブリティッシュ・エアクラフトが参加し、ヨーロッパの航空機産業を代表する国際合弁会社エアバスインダストリができあがった。その後の四半世紀の間に二四九一機を生産、または受注している。現在の従業員数は三万二〇〇〇人であるが、一〇〇〇社以上の下請け会社では一〇万人が働いている。

エアバスインダストリは、一九七二年一〇月にA300―B1の原型機を初飛行させたのを皮切りに、一九七四年五月にA300―B2型機をフランス航空とルフトハンザ航空の定期路線に就航させた。イースターン航空は一九七七年に米国のエアラインでは初めて、A300―B4を購入した。その頃の航空輸送界は世界を襲った石油危機と、米国から始まった規制緩和の影響を受けて、運航コストの削減を迫られていた。米国ではボーイング社は当時開発中のB767とは別に、コックピット内の機器を大幅に自動化することによって、それまで広胴型では航空機関士を含めた三人で飛ばしていたものを、二人のパイロットで運航可能にするB757の開発に着手し、またはじめ三人乗務で計画したB767も二人乗務に設計変更した。

これまで航空機関士がしていた仕事のうち、末端の機器の操作と管理などの、自動化の階層では下層に属しているものは、下部のエージェントに委ねられ、上部の階層に関するものだけが二人のパイロットに配分された。このように、システムの階層化のメリットが最大限に発揮された

が、それに伴ってマイナスの効果も導入された。これについては、次章で考察する。

ヨーロッパの航空先進国にはこれまでコンコルドや軍用機の開発に関連して、フライ・バイ・ワイア技術を培ってきた伝統がある。コンコルドには、すでに、表1―1に示す自動操縦機能が具備されていた。この蓄積された技術を受継いだエアバスインダストリは、ボーイングの動きに対抗して、二人乗務を可能にするコックピットを開発した。エアバス社（エアバスインダストリ）はこれを正面向き型コックピット（FFC：Forward Facing Cockpit）と呼んだ。この名は、それまで操縦席の後ろで横を向いていた航空機関士がいなくなったことを、端的に表現したものである。

A310以下のハイテク機の生みの親であるエアバスインダストリのジーグラー前副社長は、「技術者たちは、常にフールプルーフ（人間が馬鹿げたミスをしても安全）に見えるほど、非の打ちどころのないロジックを持つコントロールを、設計・開発することができる」と公言し、また、「ヨーロッパの航空輸送業界が保守的なため、みすみす外国のメーカに新技術の採用で先を越されてしまった」ことを悔やんでいた。

エアバスのユーザになるエアラインも、自動化による省力効果に大きな期待を寄せた。A310を設計し、その後フランスの航空機器メーカのエアロスパシアルに移ったジャン・ピエル・ダニエル技師は、「複雑な広胴機のコックピットに航空機関士を残すことについて、組合がまとも

機　　能	概　　　要
高度選択および維持	あらかじめ入力された飛行経路に沿って上昇、降下する
マッハ数変更および維持	あらかじめ入力されたマッハ数スケジュールに従って飛ぶ
垂直速度選択および維持	あらかじめ入力された上昇／降下スケジュールに従って飛ぶ
方位選択、捕捉および維持	指定された方位に旋回したあと、その方位を維持する
航跡選択、捕捉および維持	指定された飛行コースに入り、そのコースを維持する
VOR／INSカップリング	地上のVOR局から送られてくる電波と機上の慣性航法システムをカップリングし、位置情報を得る
ローカライザ捕捉とカップリング	地上の着陸援助設備からの進入路誘導電波を捉え自動操縦システムとカップリングさせ、旋回してその波面に乗る
グライドスロープ·カップリング	ローカライザとカップリングしたあと降下経路面を指示する誘導電波と自動操縦システムをカップリングさせ、その波面に乗る
進入復行のための経路ガイダンス	着陸進入やり直しのとき、あらかじめ指定された高度まで上昇し、その高度を維持する
フレア·コントロール	接地直前の自動的機首上げ操作を行う
ロールアウト	着陸後滑走して滑走路を離れる自動走行をコントロールする。霧の中では不可欠

表 1-1　コンコルドの自動操縦機能

な議論ができなくなるほどの（徹底した——著者注）自動化を進めてくれという、エアラインからの過大な圧力があった」と、当時を回想している。

このように自動化の意義を省力に求める考え方は、エアバスだけに限ったことではない。当時わが国を訪れたボーイングのある副社長が、「三組の眼の利点も、彼らの三つの口のコストによって帳

消しになる」と言って、二人乗務の新型機を売り込んでいた。

しかし、欧米が競争で開発した二人乗務のジェット旅客機に対しては、各方面から安全性に対する疑問が出された。国際エアライン・パイロット連合も二人乗務に対する懸念を表明した。米国のレーガン大統領はこの問題を調査するためのタスク・フォース（特定の問題の検討グループ）を設置して、従来の三人乗務の旅客機と比較調査し、安全性の検討を進めた。エアバスインダストリもA310での二人のパイロットにかかる仕事の負担（ワークロード）の評価を精力的に行い、自動化コックピットの省力効果を確認した。

このような各国の努力の結果、米国政府は一九八一年七月に、ボーイングB757、B767、およびエアバスA310の三機種は、性能的には二人乗務によって安全に運用できると結論した。わが国では一九八五年、B747―400の導入に伴い航空法の一部改正を行い、四基以上の発動機を有する航空機での乗員の二名編成を合法化した。

しかし、問題はワークロードが増えたかどうかということよりは、むしろ仕事の質が変わったことによって、ヒューマンファクターズ（状況認識の欠落、警戒心の低下、注意力散漫、倦怠などの人間の認知心理的なマイナス面に起因する問題）が深刻になったことにある。自動化は機械と人間の間の仕事の再配分であるから、操作の単純化やシステム・モニターの取捨選択によって、ワークロードは適宜節減できる。したがって、自動化の評価を作業量だけに限るのは適当で

はない。自動化が航空機関士の代替になっているかどうかではなく、自動化がクルーのチーム能力を活用できているか、コックピット内の仕事の変化が安全にどう影響するか、などという質的問題を追究すべきだった。ところが、実際は手足の動きや視線の移動などの簡単に測定できる量だけで、ワークロードが決められた。

フランスでは二人乗務についての労使間の議論は、航空機関士の雇用問題に偏った。わが国では日航の社内検討の際、ワークロードを議論するなかでメンタル・ワークロード（頭脳労働量）の検討の必要性が指摘された。しかし、メンタル・ワークロードの測定は難しいということで議論がそれ以上発展しなかったのは、残念なことである。

過渡期のハイテク機A300−600

このA310は二クラス二一六席とやや小型であったので、それよりも大きく、すでに一九七四年から一〇年近い運航実績のあるA300に、この新しいコックピットを取り付け、二クラス二六七席としたものがA300−600である。その原型機はA300FF型と呼ばれた。添字のFFは「正面向き」を意味する。この改造型は一九八〇年末にサウジアラビア航空からの受注を得て開発が決定され、一九八三年七月に初飛行した。これがA300−600型機誕生のいきさつである。

エアバスインダストリはその後も開発努力を続けた結果、民間機で初めて本格的なフライ・バイ・ワイアを採用したジェット旅客機Ａ３２０を、一九八七年に世に送った。Ａ３２０は超音速旅客機コンコルドで世界の航空技術をリードしたフランスにとっては、再度、国の威信を賭けた航空機開発でもあった。初飛行が行われたのは一九八七年二月二二日である。

エアバスのフライ・バイ・ワイアの設計概念は、Ａ３２０、Ａ３３０を経て、Ａ３４０に至って完成された。当然、それに先行したＡ３００－６００とＡ３１０は、コンピュータの数も記憶容量もＡ３４０と比べてかなり小さい。Ａ３００－６００のコンピュータ化率はＡ３４０に比べると二五パーセントといわれる。ちなみに、Ａ３２０のコンピュータ化率は、Ａ３４０の八〇パーセントで、自動航法システムの共通性はかなり高い。これに比べるとＡ３００－６００の自動化技術は過渡期のもので、Ａ３００の機械式計器システムと新しいデジタル式のディスプレイとが同居していた。次の章に述べるＡ３００－６００とＡ３１０の事故は、このような過渡的な状況のもとで起こった。

プッシュボタン・テクノロジとサイドスティック

フライ・バイ・ワイア機は外観こそ大した変化はなかったが、コックピット内部の様相は一変した。従来型機のコックピットではスイッチがところ狭しと並んでいたが、新しい世代のジェッ

ト輸送機ではパネルの上に押しボタンが並んでいる。A320のコックピット・パネルに並んだ計器類は大部分がCRT（テレビのブラウン管と同じ、陰極線管）を使った電子式表示に統合表示されているので、「グラス（硝子）コックピット」の異名を持つ。また、操縦用のスティックは両側の操縦席の横に移され、パイロットはじかにディスプレイの画面と向かい合う。見たところスッキリした感じである。コンピュータへの操縦指令の入力は多くの押しボタンとスイッチを使ったロジック操作によって行われる。エアバスインダストリはこの技術を「プッシュボタン・テクノロジ」と呼んでいる。

プッシュボタン・テクノロジを採用した目的は、エアバスインダストリによれば、

（1）操作端末を最適位置に再配列し、統一性と集中性をよくすること

（2）人間／機械のインターフェース（「人間と機械との接触領域」の意味で、入出力・表示装置のこと）を改善してコックピットの準備作業とモニターを容易にするとともに、異常運航の際の手順も簡単になること

の二点である。

従来型機ではコントロール・ホイール（操縦舵輪）を前後に動かしたり左右に回すと、その操作量に応じてエレベータやエルロンの舵角が変わったが、A320ではこれを両側の操縦席の横にある棒状のサイドスティックで行う（図1―19）。このサイドスティックを押し引きすると、

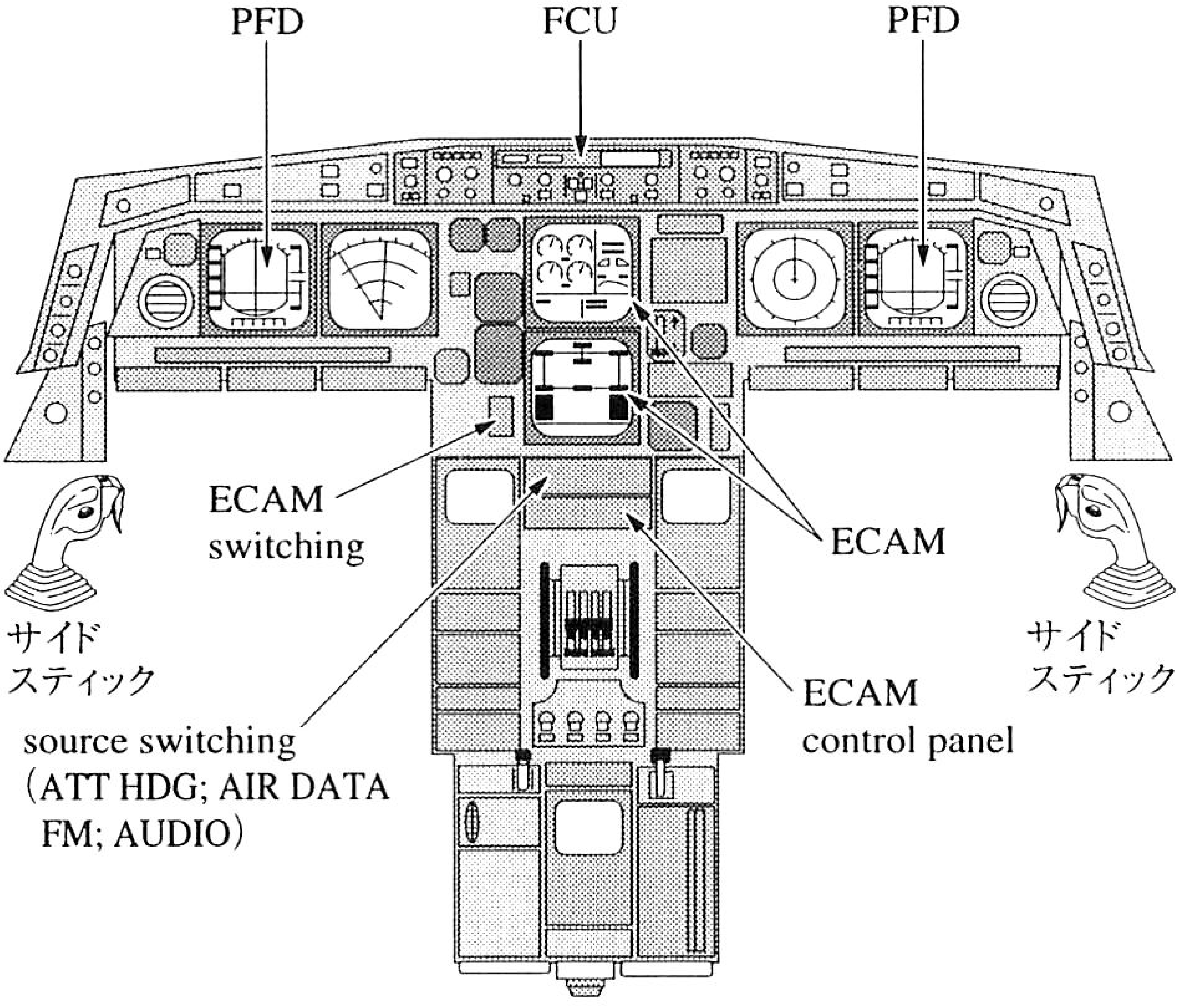


図 1-19　A 320 のコックピット

その移動量ではなく、操作する力が電気信号に変換され、制御コンピュータに入力される。この力に応じて何がどうコントロールされるかは、そのときコンピュータで使われている制御則によって違う。

Cスター制御

Ａ３２０では、着陸しようとして高度が一五メートル以下になったとき以外は、機体のピッチ姿勢のコントロールにはＣスターと呼ばれる制御則が使われる。この制御方式は、もともと宇宙船スペースシャトルの飛行制御のために開発された技術であるが、ヨーロッパで国際共同開発

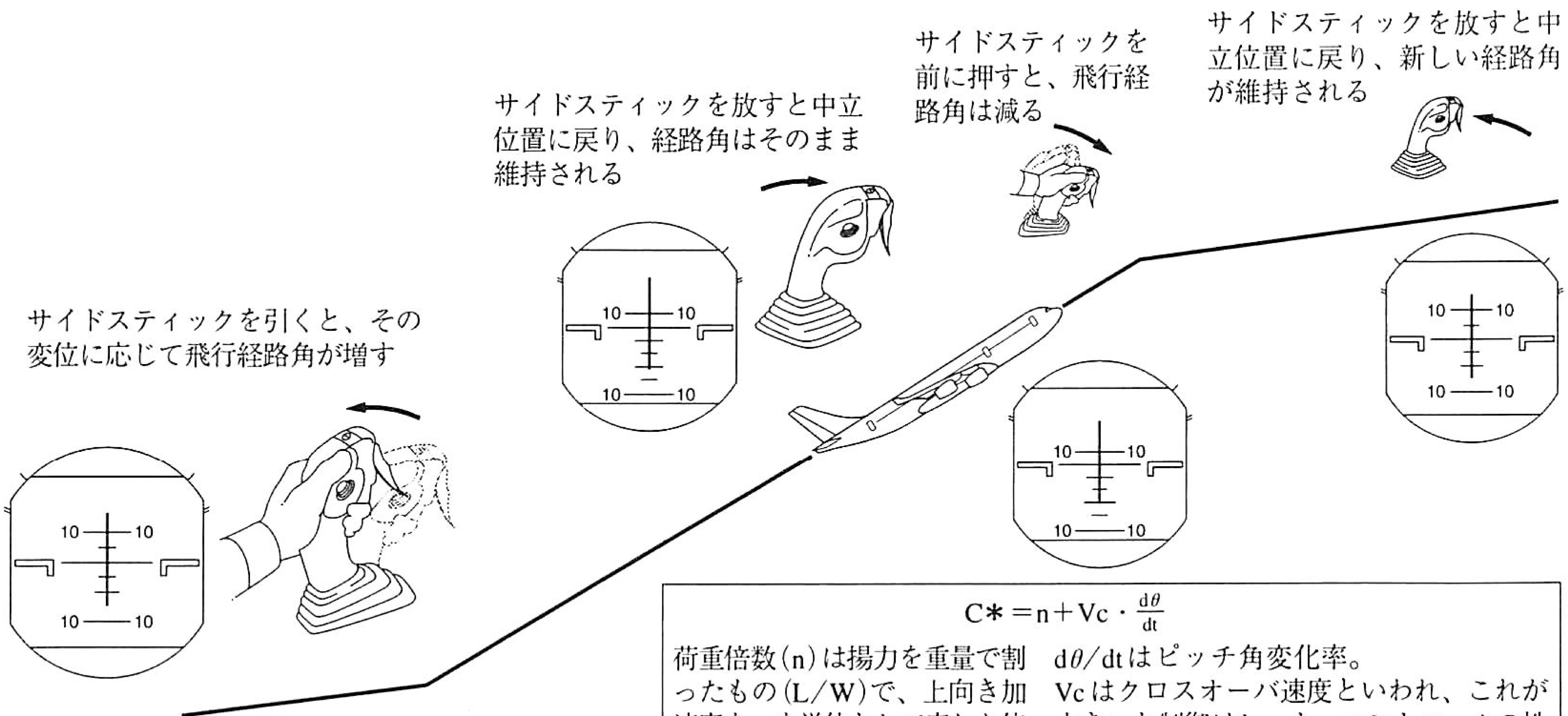
された超音速ジェット機コンコルドでも、一九七八年に左側の操縦席にサイドスティックを取り付け、それを使ってCスター制御で飛行試験が行われている。

図1―20にCスター制御の概要を示した。定義式の第一項の荷重倍数nは揚力Lを重量Wで割ったもので、垂直上向き加速度を重力gを単位として表したものである。ロケット打ち上げのとき「八gの加速度」というときの八に相当する量である。旅客機の場合はそれほど大きな加速度は発生させない。引き起こしや旋回のときは一・二〜一・五程度の値をとる。乱気流のなかを飛行しているときや、空港で接地する瞬間などに、大きな衝撃を受けて驚くことがあるが、それでも二に達することは滅多にない。

第二項はピッチレート（角速度）に比例する項である。

第一項と第二項のどちらが優位になるかは、速度による。第一項は空気力（揚力L）であるから速度の二乗に比例して大きくなるのに対し、第二項は速度に関係しないから、高速になればなるほど第一項が卓越する。したがって、高速ではCスターは乱気流や急激なマヌーバによる運動荷重に敏感に反応する。低速で飛んでいて突風で下からあおられても、ピッチ姿勢は変わらないのに主翼の揚力が急に増して荷重倍数が増えるから、Cスター方式の制御は突風荷重を制御することになる。

輸送機（旅客機）ではマヌーバするとき機体にかかる運動荷重は、設計上二・五g以下に制限



$$C* = n + Vc \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

荷重倍数(n)は揚力を重量で割ったもの(L/W)で、上向き加速度をgを単位として表した値。水平飛行では1、フレアとローテーションでは1以上、上昇と降下では1よりわずか小さい。

$d\theta/dt$はピッチ角変化率。
Vcはクロスオーバ速度といわれ、これが大きいと制御はレート・コントロールの性格が強くなり、機体のピッチはスティックの力に敏感に反応する。運動が定常に戻ったあとは、ピッチ姿勢を保つ効果がある。

図 1-20　ピッチ角のCスター制御

されているが、そのような荷重制限をするためには、このCスター方式が適している。
低速域では第一項は速度の二乗に比例して小さくなるから、Cスターの値は第二項のピッチレートに対し敏感に変わる。着陸進入するときのような低速では第二項が卓越するから、Cスター制御はピッチレート制御の性格を持ち、スティックの入力に比例した変化率でピッチ角が変わる。
係数V_Cが大きいと、第二項が卓越する速度範囲が高速側に広がる。このように、V_Cは制御の性格がピッチレート制御から荷重制御へ移り変わる（クロスオーバする）速度の目安であるから、クロスオーバ速度と名付けられている。
A320の場合、スティックを強く引けば引くほど、その力の強さに応じた変化率でピッチ角が増え、上向き加速度が発生して飛行経路が上向く（図1―20）。その後、スティックを中立位置に戻すと、その時のピッチ角が保たれ、上昇経路角一定で上昇する。
従来のように、直接コントロールされるのがエレベータである場合は、まずエレベータ角が変化して水平尾翼に作用する揚力を変化させ、それが機首上げの回転力（モーメント）を発生させる。その力で機体がピッチ軸を中心に回転し始めるというプロセスであるから、空気力が小さい低速では機体の慣性（正しくは慣性能率）が大きいと、操舵に対し機体の応答が遅れがちで、いったん起こった運動の減衰もよくない。そのため機体の姿勢も飛行経路もふらふらする。

これに対して、Cスター制御ではピッチ角が直接に制御され、さらにCスターの第二項は時間微分項であるから、突風などの外乱によるピッチ変化に対しダンピング効果を現すので、一時的に姿勢が乱されてもすぐに安定し、降下角がきちっと決まる。着陸進入のときは迎角（機体と空気の流れのなす角度）は大きくて失速迎角からの余裕が少ないから、突風を受けてもピッチ角が大きく変化しないように制御し、またグライドスロープから逸脱しないために降下経路角を一定に保つCスター制御がとくに有効だ。

図1－21はA320の従来の制御方式とCスター制御方式による飛行データを比較したもので、これをみると、Cスター制御の性格がわかる。従来の方式ではスティック入力に対応してエレベータ角が変化しているが、Cスター制御ではスティック入力に対応してピッチレートが変わる。それを実現するエレベータは複雑に動いている。時間が経ってもピッチ角と経路角は一定に維持されている。Cスター制御はこのような難しい状況下での制御に適し、がっちりした制御感覚を与えるので、パイロットには好評である。

B777ではCスターU制御と呼ばれる同様な制御法が採用されている。この添え字Uは、速度Uのふらつきを抑制する、速度安定機能があることを意味する。

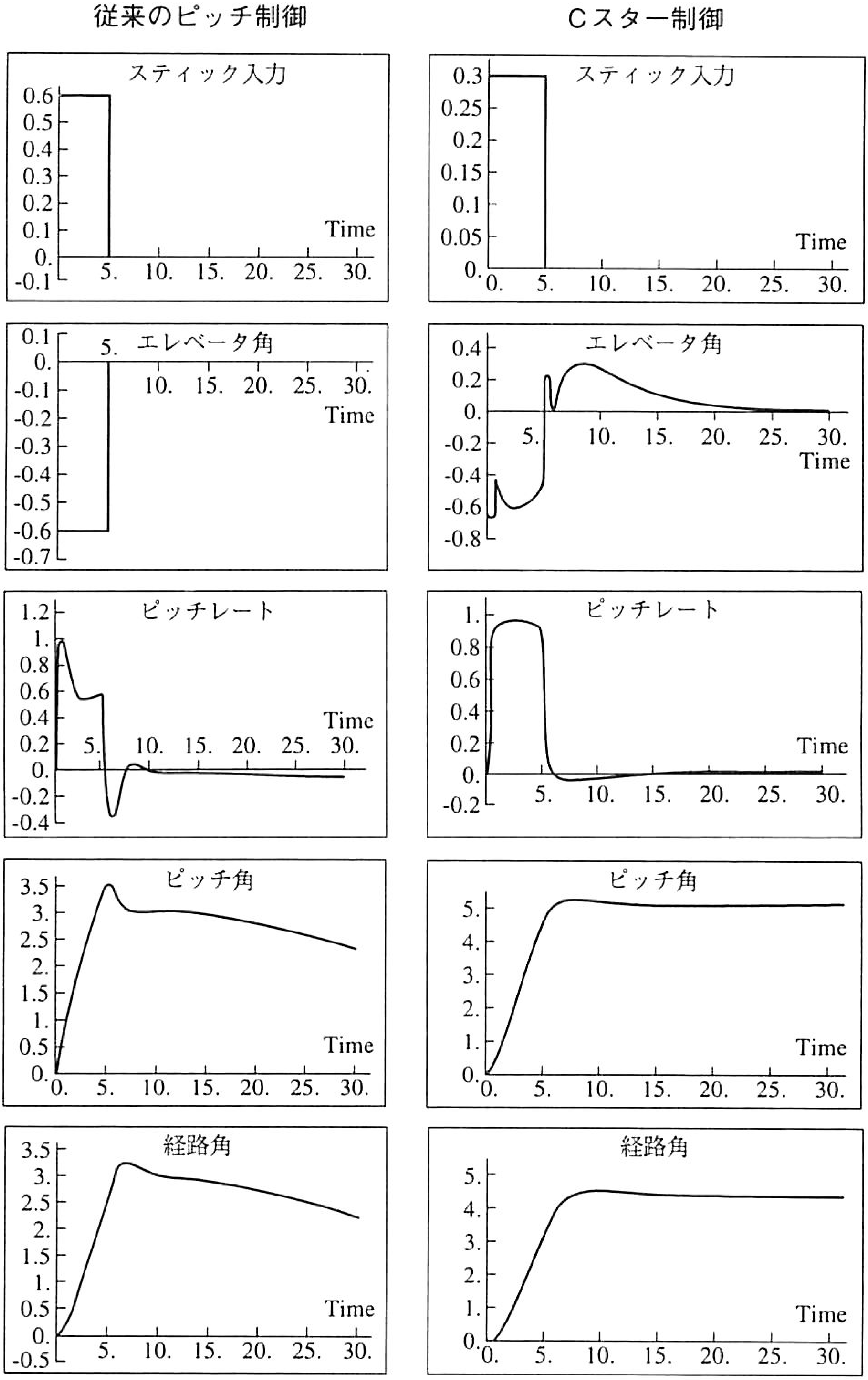


図 1-21　Cスター制御による飛行データ（300 kt 25 % C.G.）

堅固なプロテクション

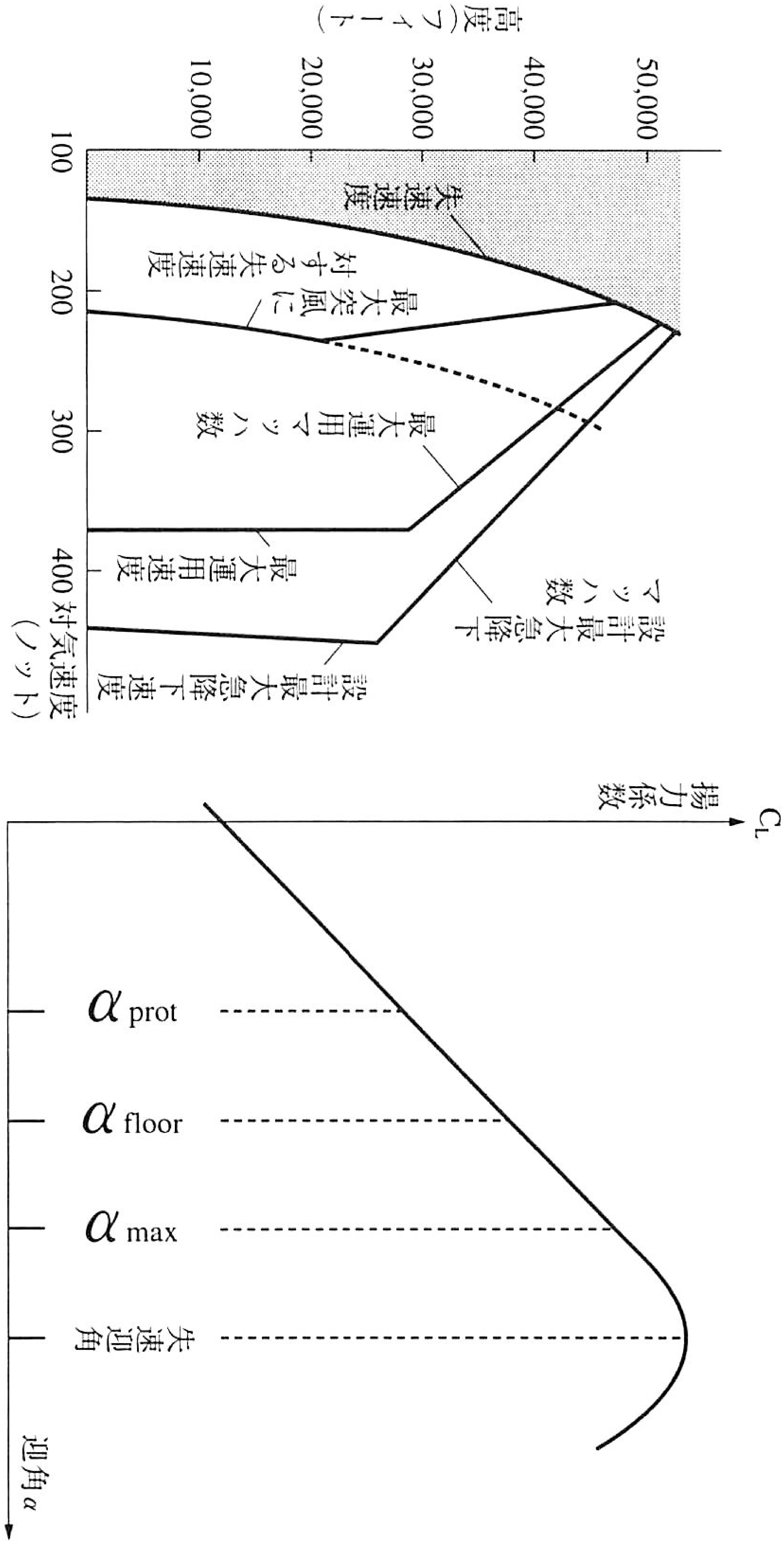
航空機の飛行速度は、低速側は失速からの余裕を、高速側は衝撃波失速あるいは構造強度から許される最大速度からの余裕をみて、ある範囲内に制限されている。これに飛行高度の制限を加えると、飛行包囲線が描かれる（図1−22）。離着陸のときは低速側の失速が最も重要な制約条件になる。従来の手動操縦ではパイロットはこの失速速度から相当の余裕をもった速度で飛ぶよう注意を払った。しかし、自動化された航空機ではこの制約条件を守るのは、機械の仕事になった。自動操縦と自動スロットルを使用して、速度を制限範囲内に保ち失速を防止する自動化機能を、スピード・プロテクションという。

Ａ３２０には失速防止のため、次のような入念なスピード・プロテクション機能が備わっている。

（1）ピッチ姿勢プロテクション　ピッチ角が二五〜三〇度以上（フラップ角と速度により変わる）になるのを防止する。迎角にかかわりなく、姿勢を制御する。

（2）アルファ・プロテクション　迎角がα_{prot}（一四・五度）を超えると、スティックは迎角を直接コントロールするように切り替わるが、パイロットがスティックをいっぱいに引いても、迎角は一七・五度を超えないように制限されている。

（3）アルファ・フロア　低い高度を飛んでいるとき、強風などによって迎角が急増し一五度に



(a) 飛行包囲線　(b) 失速プロテクション

図 1-22　飛行包囲線と失速プロテクション

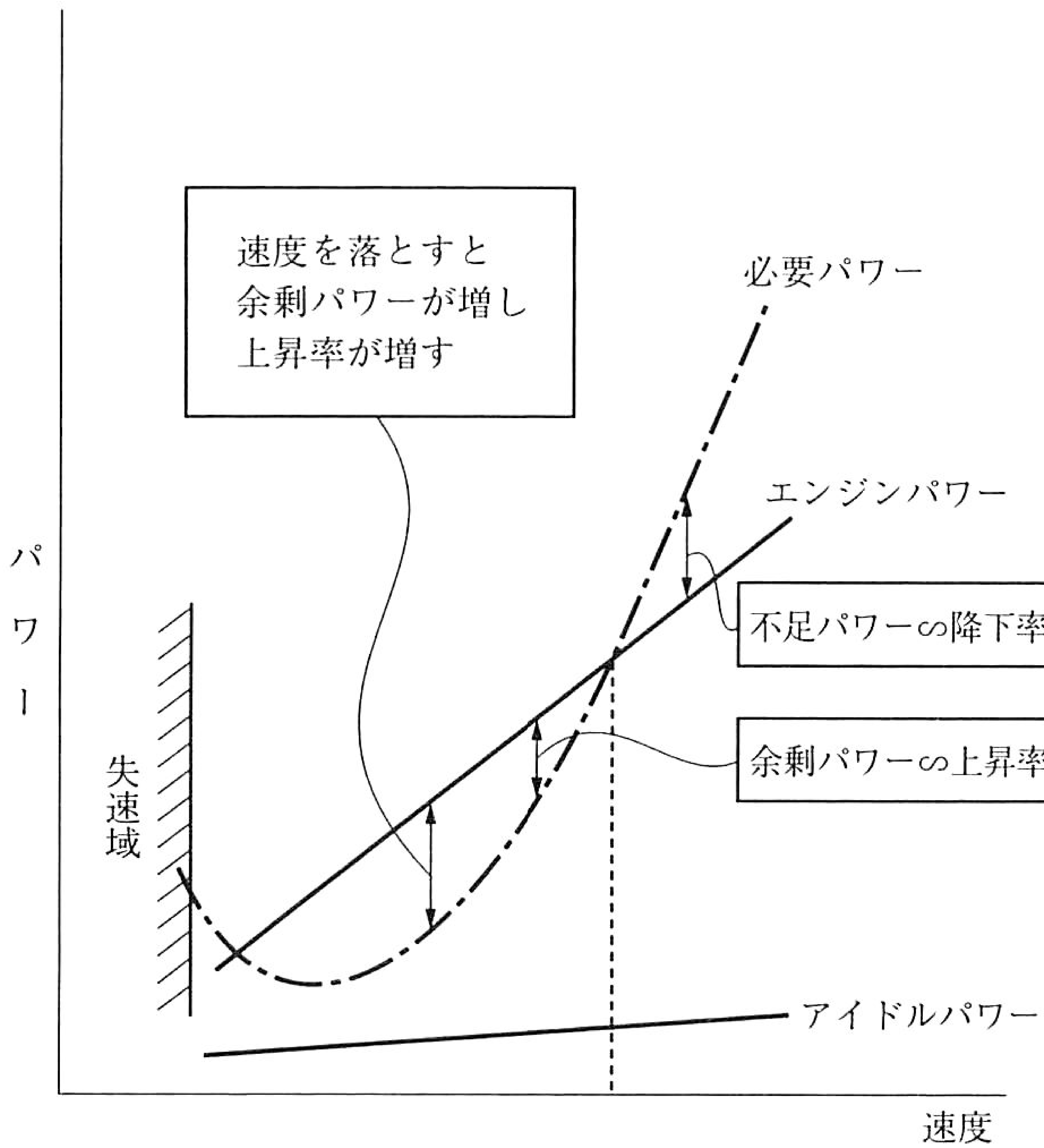


図 1-23　余剰パワーと上昇率

達すると、自動的にエンジン・パワーが増しピッチを上げて上昇し、それによって墜落を防ぐ強力なプロテクションである。着陸をやり直すゴーアラウンド（復行）と同じ操作なので、これを自動的ゴーアラウンドともいう。ただし、これは対地高度

三〇メートル以下では作動しない。なぜなら推力が急に増して機首が上がっても、しばらくは降下は止まらないから、機体の尾部が地面を打つ恐れがあるからである。

A320はこのような堅固な速度プロテクションが特徴である。これに比べ、B747−400は、これほど徹底したプロテクション機能は持っていない。例えば、V／Sモード（指定された上昇率を維持して上昇するモード。エアバスのVSモードも同様）を例にとろう。図1−23に示したように、上昇率は余剰パワーに比例する。余剰パワーとはエンジンパワーと必要パワー（抗力に逆らって機体を前進させるために必要なパワー）の差である。命令された上昇率が大き過ぎるとパワーが不足し、その上昇率が出ない。図に示したように、速度を落とすと余剰パワーが増え上昇率が増すから、自動操縦は速度を減らそうとする。そのとき失速速度に近づくと警報は出るが、速度プロテクションは働かない。したがって、失速速度に減速しないようにエンジン推力と速度をコントロールすることは、パイロットの責任である。

逆に降下する場合には、エンジンをアイドルに絞っても指定された降下率が出ないと、自動操縦は機首を下げてスピードを上げ、この降下率を実現しようとする。このとき最大運航速度を超えると警報は出るが、パイロットの命令を無効にするような速度プロテクションは働かない。その代わりに、パイロットが必要と判断したら随時自動操縦に割り込み、任意の速度にコントロールすることのできる「速度介入モード」という機能がある。

パイロットの現場での状況判断を重視し、自動操縦への介入の余地を残したこのようなプロテクションは、「ソフトなプロテクション」と呼ばれる。

ピッチ姿勢維持モードとフレア・モード

A320では着陸進入のとき、ピッチ姿勢制御は基本的にはCスター制御であるが、高度が一五メートルを切ると、コンピュータは高度一五メートル通過時のピッチ角を記憶し、スティックに力を加えない限りその姿勢を維持しようとする。これがピッチ姿勢維持モードである。そして、最後の高度九メートル以下になると、フレア・モードに切り替わる。この操縦モードでは、コンピュータは機体のピッチ角が八秒間でマイナス二度になるように、徐々に機首下げを操縦システムに命令する。パイロットはこれに逆らって、機首を上げる操舵をしなければならない。

なぜこのような機首下げを自動操縦装置にさせるのだろうか。

航空機の高度が下がり、地面から翼幅（両翼の端から端までの長さで、普通、三〇～五〇メートル程度）以下の高度になると、地面効果が現れて機首が下がる。

まず地面効果とは何かを簡単に説明しておこう（図1―24）。着陸しようとしてフラップを下げた形態では、主翼に働く空気力は機首を下げようとする。これに対し尾翼は下向きの揚力を発生させて機首を上げることによって、バランスをとっている。主翼がフラップを下げていると、

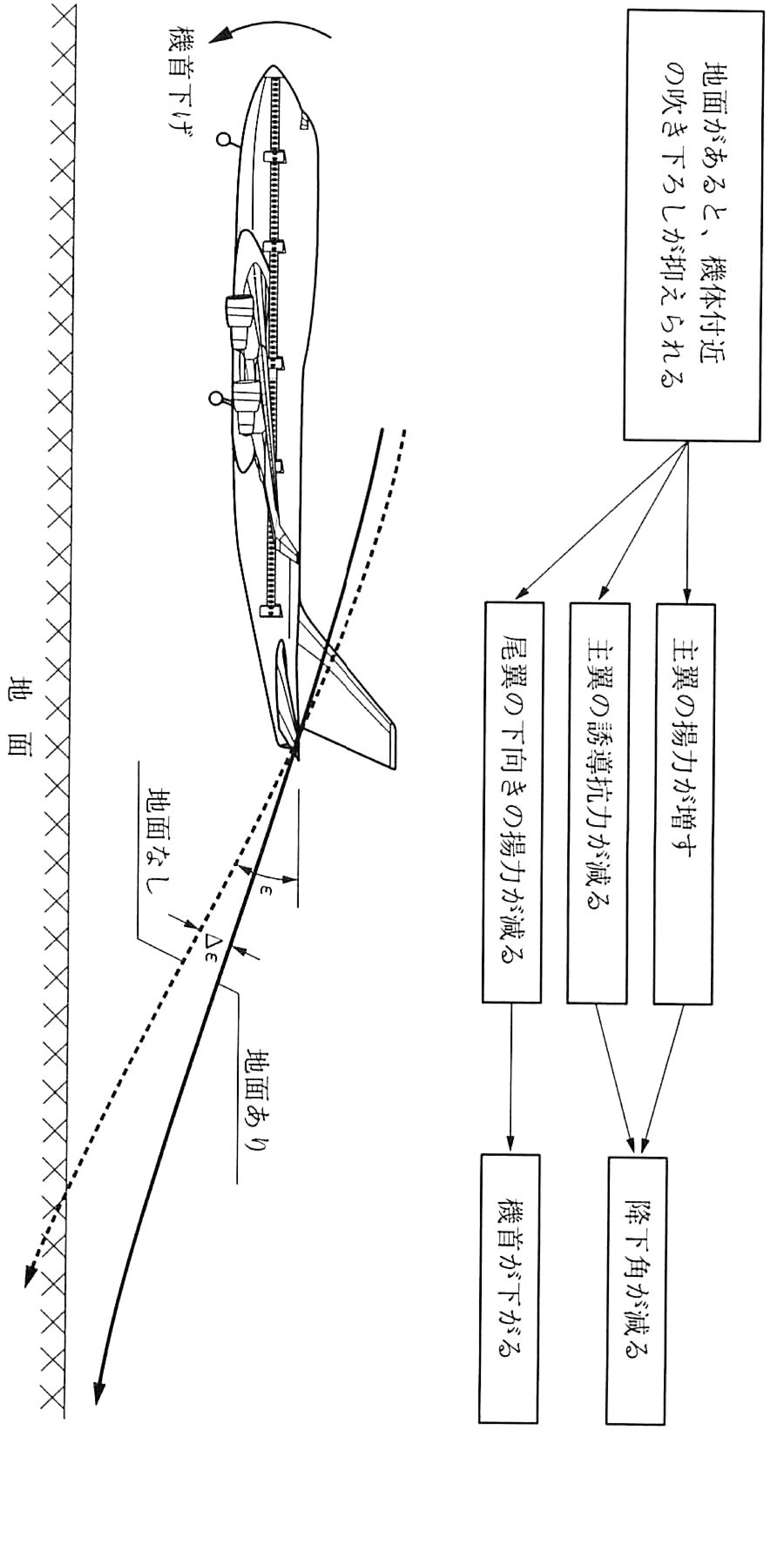


図1-24　地面効果（ε：吹き下ろし角）

尾翼付近の流れは強い吹き下ろしになるが、地面が近づくとこの吹き下ろしが地面によって抑えられて弱くなるため、尾翼の下向き揚力が減る。そのため、機体としては機首下げになる。従来、パイロットはこの地面効果による機首下げの傾向に逆らい、また接地するときの降下率を減らすために、高度が一〇～一五メートルになるとエレベータを引いて機首を上げる、フレアというマヌーバを行ってきた。

ところが、Cスター制御はピッチを一定に保つから、地面効果による機首下げまで抑制してしまう。従来のような接地をするには、図1－20で説明したと同じ方法によって、まずスティックを引いて降下経路角を浅くする。次に、スティックを中立位置に戻して、その浅い経路角を保って接地する。このスティックを引き押しする操作は従来のフレアとは違うから、旧型機から乗り換えたパイロットは混乱するかも知れない。また、自動操縦装置を使わずに着陸する基本的な技量も必要であるから、それを実行する機会を失うことは、さらに重大な問題である。そこで、わざわざ自動操縦装置に地面効果を真似た演技をさせるのである。

しかし、実際にはこのフレア・コンペンセーションをしなくても、うまく接地するから問題はないという意見もある。ピッチ姿勢は保たれているし、地面効果で揚力が増え抗力が減る結果、揚力／抗力比が増えるから、降下経路角が浅くなる。このように地面効果は一種のクッションの働きをして、あえてフレアしなくてもスムーズに接地できるからであろう。この接地時の自動的

ピッチダウンは考え過ぎのきらいがあるようである。
いずれにしてもこのように、自動操縦システムは着陸時には演技をすることによって、パイロットの従来の操縦感覚に合わせようとしている。それを知らずに自動操縦に任せきりにすると、危険なことになる。

こいつ、いいやつだ

自動操縦は問題点も多いが、それにもかかわらずパイロットに受け入れられている。その例として、鎌田慧氏の著書『大空港25時』（草思社刊）のなかから、匿名のパイロットの次の談話を引用する。

「飛行機というのは生きているんです。すごくかわいい。というのはオートパイロット（自動操縦装置）にいれておいて、小さなスイッチを指先でちょっとまわしてやっただけで飛行機はちゃんと動いてくれます。人間はそうじゃないですね。（中略）こんなに大きなものが、自分の指先ひとつで動かせるというのは、『ウーン、こいつ、いいやつだなあ』っていう気はしますね」

実際、エアバス系のジェット機は機首を持ち上げるとき、パイロットは最初の間だけ操縦桿に力を加えればよい。そのあとすぐにオートトリム（自動トリム）機能が働いて、スタビライザを動かしてパイロットの操舵を引き取り、パイロットが手を放してエレベータが中立位置に戻って

も、機体の姿勢はそのまま保持される。その後はわずかな機首の上がり下がりを修正するため、軽く操舵してやるだけでよい。

あの重い機体を空中に持ち上げるときの醍醐味はパイロットでなければ味わえないもののようだ。自動化された大型ジェット機がパイロットの指示に忠実に従うとなれば、パイロットの機械に対する信頼はさらに高まる。そして煩わしい人間同士のコミュニケーションよりも、コンピュータとの対話を好むようになる。

もともと機械が好きでない人がパイロットになることはまずない。この点で、パイロットはコックピットの中に入り込んだ自動化の魅力にとりつかれやすい性向を持っている。エアバスA320の操縦も経験したスリランカのアレーム機長が、ある航空雑誌で「今日のパイロットは必要なデータをノブや押しボタンによって入力することで、外から操縦ループを見かけ上管理し制御する。当然、パイロットには最適運航を確保するために全システムの作動についての知識が必要だ。それなのに、注意と認識をもって機械を使わなければならないときに、コックピット内で利用できるあらゆる『マジック』に頼ることに執着し過ぎる」といったのは、このことである。

航空会社の経営者にとっても、自動化は「いいやつ」なのである。なにやら秘儀めいた操縦という「わざ」が、コックピットという密室のなかで行われている限り、パイロットの技量管理は困難である。自動化することによって、パイロットの養成とその後の管理が容易になることが期

待される。エアバスインダストリで操縦の自動化を押し進めたジーグラー前副社長はテストパイロット出身であっただけに、このことを誰よりも理解していた。この人は自分の進むべき道は「平均的な能力の乗務員のために、操縦しやすい飛行機をつくることです。人間に特別な能力が要求されるのは、特別な場合だけです」と言っている（M・アスリーヌ著『エアバスA320は、なぜ墜ちたか』花上克已訳、講談社刊）。

しかし、現実はそんなにうまくはいかない。自動化された航空機にも、この「特別な能力」を使わなければ乗り切れないような危機が頻繁に起こっているのだ。

技術の復讐

科学技術の歴史には、最善を期して開発された技術が、いざ実現してみると思いもかけない結果を生んだ物語がいくらでもある。歴史学者のエドワード・テナーという人が書いた『なぜ物事は裏目に出るのか……技術と意図せぬ結末の復讐』（クノップフ刊）という本のなかに、アメリカンフットボールの防具の例が挙げられている。それはフットボールを安全なスポーツにするため、ヘルメットやら肩当てやらの防具を作ったところ、動きがかえって荒っぽくなり、無防備のラグビーよりも危険なスポーツになってしまったという話である。

このテナーの本には、この防具の話のほか、蚕を米国に持ち込んで絹を生産しようとして野生

化した蚕に森林を食い荒されたこと。南米から狂暴な蟻が米国に入り込んで、人畜はおろか電線まで食いちぎったこと。さらにこれをＤＤＴを散布して退治しようとしたら、天敵を殺してしまい、かえってその蟻を増やしてしまったこと。オフィス・オートメーションの結果、ペーパーレス・オフィスどころか事務室のなかがプリンター用紙だらけになったこと、などの多くの例が挙げられている。

著者のテナーは、別に反技術のイデオロギーを説いているのではなく、技術が高度化したために、その導入の結果がますます予測しにくくなった現実を警告しているのである。次の章に述べるアプセムでのＡ３２０の事故でも、トップクラスのパイロットがプロテクションを過信したため慎重さを欠いた操縦をして事故を起こしてしまうことを、誰が想像したであろうか。

次章以下でテナーに倣って、これまでの操縦自動化が現実にどんな結果をもたらしたかを確認してみよう。

第二章
自動化の落とし穴



前章で人間が天賦ではない飛行能力を獲得するため機械に頼ったこと、またその能力を強化するために自動化を進めてきたことについて述べた。このような道を進んだ結果、人類は動物飛行では達し得なかった超音速飛行から、果ては宇宙飛行までを成し遂げた。

ところが今、われわれは航空旅客輸送の分野で、まえがきに述べたような問題を抱えている。いったい、自動化の何が問題なのであろうか。

この章以降でこの問題を主題にして論じるが、ここで問題を先取りして、自動化に対する批判を要約してみると、それは次のようになる。

（一）飛行に必要な情報を機械系から与えられたものだけに頼り、視界などの外部ソースを活用した基本的なナビゲーションを行わなくなった

（二）航空機と地面との関係についての知覚と認識を失い、乗機が危険な状態に陥っても、気がつかなくなった

（三）設計者は安全性を高めるために自動化だけに頼り過ぎ、その結果、過剰保護になった

（四）手動操縦が少なくなり、パイロットの運航への参加意識、満足感、達成感が減った

（五）手動操縦の技量の価値が低下し、事故に対する責任が機械に分散されたと感じるようになった

まず、この（一）から（三）に関連した問題について、具体例を挙げて説明しよう。（四）と

（五）については、コンピュータとパイロットの関わりを重点にして、次章で述べる。

冥界への飛行

一九七〇年代に入ると、ある程度コンピュータ化された旅客機が開発され始めた。マクダネル・ダグラス社が開発したＤＣ10型機も、慣性航法センサ／航法コンピュータから構成された誘導システムを二系統持っている。この航法コンピュータに出発点と目的地、途中のウェイポイント（通過点）の緯度・経度を入力しておくと、離陸後の上昇、巡航、カテゴリⅢまでの気象条件下での着陸、ゴーアラウンドなどの各飛行段階で自動飛行ができる。しかし、このシステムに毎日の飛行計画と航法データを入力する作業を、パイロット以外に地上要員が携わるようになった結果、この人々が犯すエラーが運航中に発生する事故原因に入り込んできた。

一九七九年に南極で起こったＤＣ10型機の事故は、その前兆であった。

この年の一一月、南半球は盛夏を迎えようとしていた。毎年夏になると氷棚（ひょうほう）を見ようとする観光客がおしかける。南極大陸の地表は夏冬を問わず厚い氷のベッド（氷床）で覆われているが、氷床が海に張り出した部分を氷棚という。ロス海に張り出したロス氷棚が有名で、その厚さは二〇〇～三〇〇メートルが普通だが、場所によっては一〇〇〇メートルを超すこともある。この日もこの氷棚を見ようという観光客を乗せたニュージーランド航空のＤＣ10がオークランド空港を離

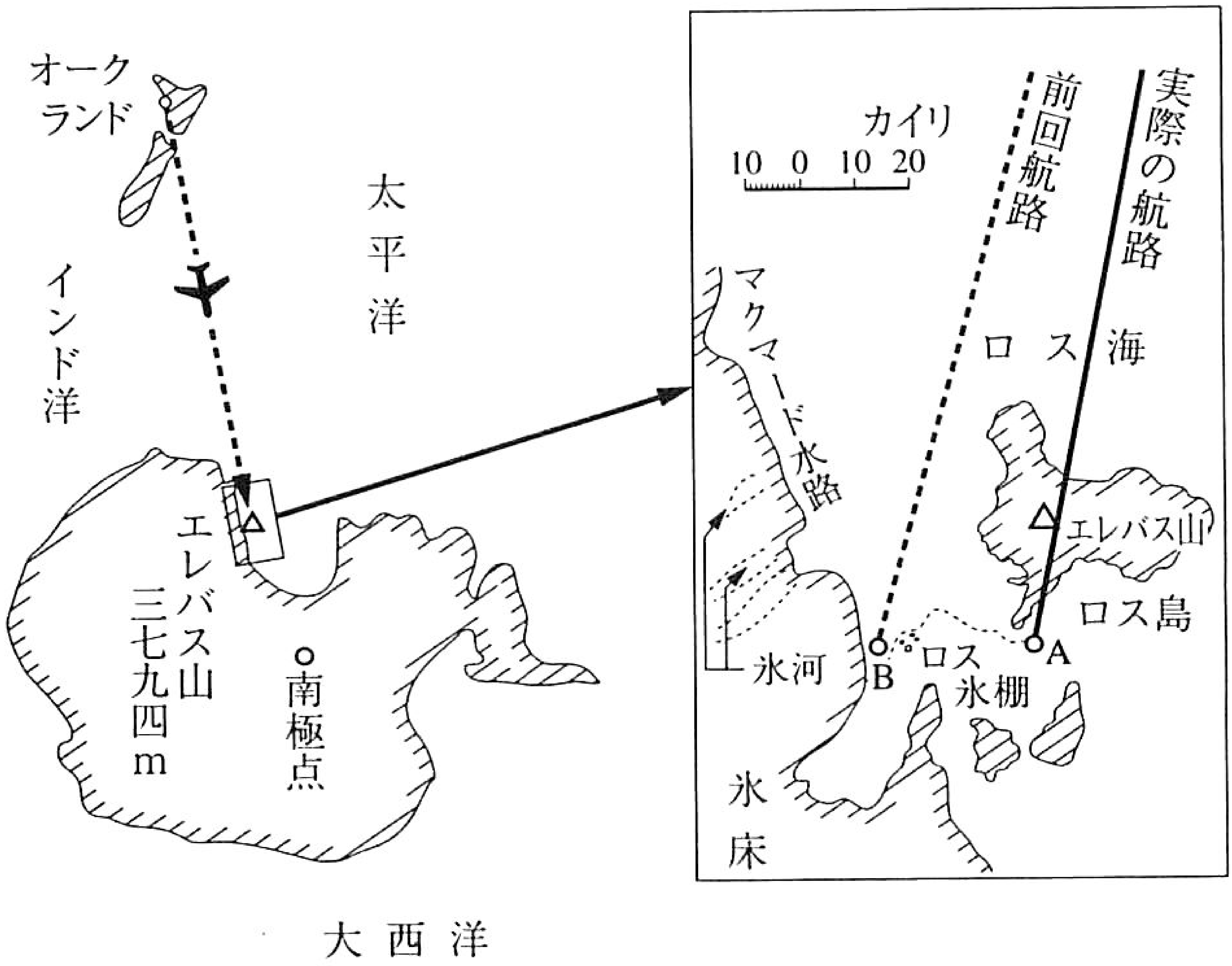


図 2-1　南極大陸（エレバス山）

陸し、南下してロス海から南極大陸上空を目指した。ロス海沿岸には米国のスコット基地があり、その近くにエレバス山という活火山がある。高さは富士山よりやや高い三七九四メートルである（図2―1）。

その日の二度目のツアー飛行のことであった。エアラインの航法部門の職員が出発直前に、前回とは違うルートをコンピュータに入力したが、このことをパイロットに伝えなかったことが事故の発端になった。パイロットは海上を通って図のB点に至る航路を飛んでいるものと思っていたが、実際は新しく航法コンピュータに入力された、エレバス山の上空を通って図のA点に至る航路を飛んだ。

事故現場の上空をDC10は目視飛行方式

で飛んでいた。目視飛行方式とは、パイロットが目で見て地表からの高度や他の航空機との間隔を設定しながら操縦する。障害物との衝突回避はパイロットの責任である。その日、エレバス山の周辺を支配していた視覚現象は、極地方を飛行するパイロットの間で「ホワイト・アウト」と呼んで恐れられていたものであった。雪が山腹を覆って灰白色の空と溶け合い、空と山とが全く区別できなかったのだ。しかし一度目と同じコースを飛んでいると信じていたパイロットは、十分安全な高度を飛んでいると思っていたらしい。

機は緩やかに降下する飛行経路をとって山腹に突っ込み、乗っていた日本人二四人を含む二五七人全員が死亡した。地面接近警報装置（GPWS）が働いたかも知れないが、間に合わなかったと推測されている。不吉なことに、エレバスという山名は、ギリシャ神話に出て来る冥土につながる暗黒の世界で、わが国でいえば三途の川である。

この事故の発端は、前述したように地上の運航担当職員が航法データを変更したのに、それを連絡するのを怠ったことであるが、パイロットが周囲の状況を錯覚したことが決定的な原因になった。このように、地上の要員までが飛行管理システムの操作に関わるようになると、関係者相互間のコミュニケーションを確保することによって、パイロットが航法コンピュータにどんなデータが入力されているかについての認識をしっかりと持つことが必要になる。このDC10の事故は、航法自動化に伴って新しく起こってきた事態を示唆している。

その後も航法上の間違いで、例えば、コックピットで使う地図の上の地点識別符号と、航法データベースに入力されている符号が違っていたり、他の地点と同じものであったりしたために、パイロットが航路を誤り、その結果事故が起こった。次に説明する、ネパールのカトマンズで起こったタイ航空機の事故や、コロンビアのカリ空港で起こったアメリカン航空機の事故も、この種類のものである。

ヒマラヤの谷間で

一九九二年七月三一日、タイ国際航空のエアバスA310がネパールのカトマンズ空港に着陸しようとして、その南方三〇キロメートルにあるシエラDME（機上の距離測定装置に電波信号を送る地上の定点）から進入した（図2―2）。フラップを一五度に下げようとしたが故障の信号が出たため操作をやり直した。このトラブルで一分ほど時間を無駄にしたため、降下するのが遅れて着陸するには高度が高過ぎると考えた機長は、着陸をやり直すことにし、管制センターに再びシエラ進入ルートに戻る許可を要請した。ここで最初の問題が発生した。というのはタイ航空の会社が作成した地図では、シエラ進入ルートは南方七六キロメートルにあるロメオ・ポイントからスタートするように誤って記入されていたのである。そこでパイロットはこの「ロメオ」に戻る許可を要請したのだが、管制センターは「ロメオ」については何も言わず、シエラに行く

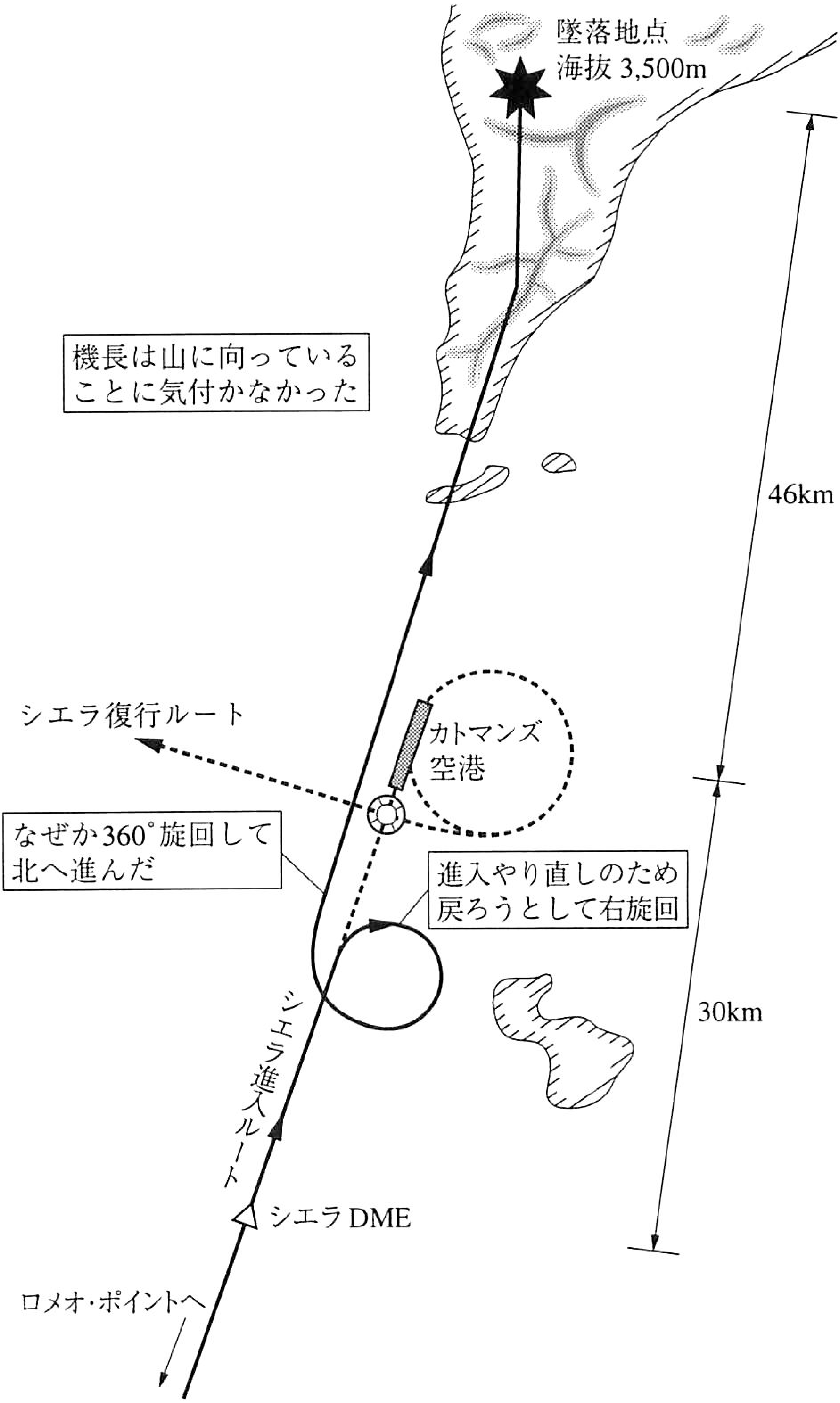


図 2-2　カトマンズ空港付近のルート図

許可を出した。また、旋回の方向も指示しなかった。

パイロットはシエラ進入ルートへの許可が得られたにもかかわらず、ロメオに向かうこと、また左旋回することの許可要請を四度も繰り返したが、管制からはそれ以上の指示は得られなかった。そこでやむなく右旋回を始めたが、どうしたことか三六〇度旋回し、ロメオとは逆方向の山岳地帯に向かって飛んだ。事故調査報告書では、パイロットはロメオ・ポイントのデータをコンピュータに入力するのに手間どったのではないか、あるいは進入チャートに書いてある誤ったデータを入力したから、コンピュータがパイロットを困惑させるような出力をしたため、旋回の終わりごろにはパイロットは方角がわからなくなったのではないか、などと推定している。

少なくとも副操縦士は墜落の三〇秒前に危険を感じ、それを機長に伝えたが、肝心の機長は副操縦士がなにを言っているのかわからなかったようだ、と調査報告は書いている。事故機は空港から四六キロメートル北、海抜三五〇〇メートルの高度で山に接近した。地面接近警報が鳴ったが、山が峻（けわ）しかったため回避操作は間に合わなかった。乗客乗員一一三名は、全員死亡した。

タイ航空側はカトマンズの管制官側の対応と、ラジオ交信の音声の質の悪さを問題にしているが、ネパール側はそれを認めようとはしていない。なお、カトマンズには航空管制レーダは設備されておらず、わずかに管制塔にＤＦ（航空機からの電波が入って来る方角だけを知らせる装置）があるだけだった。もちろん、航法援助設備ＩＬＳはない。

Ａ３１０の完備した航法機器も、地上からの支援設備がなければなんの役にも立たないことを教える事故であった。

アンデスに迷う

ボーイングの第四世代のジェット機Ｂ７５７型は、当初低い事故率を記録していたが、一九九五年一二月に南米のコロンビアで、また翌年にはドミニカとペルーで墜落事故を起こした。しかも、そのうちの一件は米国を代表する航空会社のアメリカン航空が起こしたものであったから、米国内で大きな反響を呼んだ。

しかもアメリカン航空は、一九九五年一一月にもＭＤ83型機がコネティカット州で樹木に衝突して負傷者一名を出す事故を起こしたばかりであった。また、その系列会社のアメリカン・イーグルはそれ以前の約一年のうちに米国内で三件も事故を起こしていたから、連邦航空局はアメリカン航空の運航プロシジュア（操縦手順）とパイロットの教育に不備があるとして、同社に対する監査を厳しくした。コロンビアではどのような事故が起こったのか。

一九九五年一二月二〇日、アメリカン航空のＢ７５７型機が南米のコロンビアに向けてマイアミを飛び立った。アメリカン航空はアメリカ本土と南米を結ぶ航空路線で圧倒的なシェアを誇っている。コロンビア中部の都市カリ近郊にあるアルフォンゾ・ボニラ・アラゴン（カリ）空港に

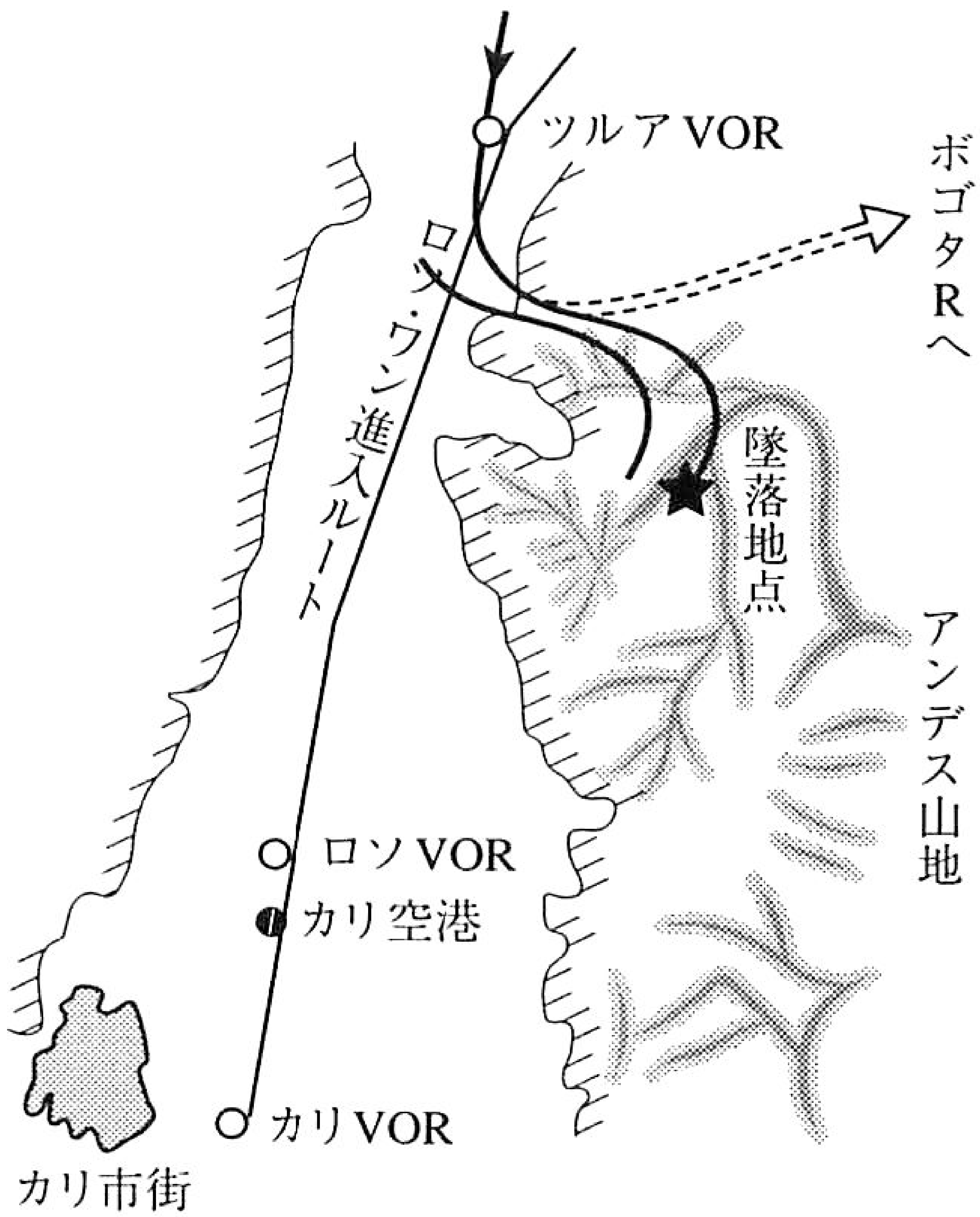


図 2-3　カリ空港ルート図

向かったこの航空機の乗客の大部分は、クリスマス休暇で故郷に帰るコロンビア人であった。

　コロンビアは南米北部にあり、中央部をアンデス山脈が走る。標高四〇〇〇メートル級の山が連なるこの山岳地帯には、北から二本の谷が入り込んでいる。カリ空港に進入する航空機は、この西側の谷の奥深くまで飛ばなければならない。

　約三時間の空の旅も終わりに近づいた。このＢ７５７は指定された航空無線標識（ＶＯＲ）を結ぶコースを辿って、自動航法モードで飛んでいた。初めコンピュータに入力された飛行計画では、カリ空港の南一四キロメートルにあるカリＶＯＲ（図２―３）の上を通って、南側から回り込んで滑走路ゼロワンに着陸する予定であった。ところがカリの管制塔と交信したとき、カリ空港の五七キロメートル北にあるツルアＶＯＲと、一七キロメートル北にあるロソＶＯＲを結ぶロソ・ワン進入ルートを通って、直

接、北から滑走路ワンナインに着陸できるかどうか管制塔から尋ねられた。アメリカン航空では滑走路ゼロワンのＩＬＳを使って着陸するのが普通だったし、その日の飛行計画もそうなっていたが、マイアミを発つとき二時間近くも遅れていたので急いでいたせいか、機長はそれを承諾した。

この突然のルート変更によって、パイロットたちはにわかに忙しくなった。短時間の間に着陸の準備をやり直さなければならなかったからだ。この仕事がどんなものかを、以下に羅列してみよう。

（1）まず、バインダから滑走路ワンナインの進入チャートを取り出し、目立つように置く
（2）その図からラジオ周波数、磁針路、高度、距離、進入復行の手順などの必要な情報を点検する
（3）コンピュータのデータベースから新しい進入路についてのデータを選び出して読み出す
（4）このコンピュータに表示された進入情報と、（1）の進入チャートとを比べる
（5）選択したラジオ周波数、機の磁針路、コンピュータに入力されたデータが正しいかどうかを確認する
（6）進入ルート上の各定点上での速度、高度、翼形態（フラップ、スラット、スポイラなどの状態）、その他エンジンなどのコントロール要素を計算し直す

（7）管制塔との交信を保ちながら、降下飛行経路とコースを監視する

コンピュータにデータを入力するには手間がかかる。とくに、空港ターミナル空域で管制からの指示が急に変わると、パイロットはてんてこ舞いになり、周囲の監視がおろそかになって危険に陥ることがある。この事故のときには、着陸までの距離が短くなったから、降下を急ぐためスポイラ（降下するとき抵抗を増すためのスピードブレーキ）の展開などの操作を同時に行わなければならなくなった。

次に機長と副操縦士はどの定点に向かって飛ぶかについて議論したが、進入前のブリーフィング（クルー間での飛行計画を確認するための打ち合せ）をしていなかったため、ロソ・ワン進入ルートがどこにあるか知らなかった。副操縦士から「管制官はロソ・ワン進入ルートといったと思いますが」と注意され、機長は急いで地図のページをめくった。「あった！　これはツルアから出ているぞ」そこで機長は急いでツルアVORに向かって飛ぶため、その地点番号一七七をコンピュータに入力しようとしたが、ここまでの確認作業に手間どったため、そのときにはツルアを通り過ぎてしまった。暫（しばら）くしてそのことに気付いた機長は、カリの管制にツルアに行くべきかどうか質問したりしたが、結局、まっすぐカリ空港に行くことに決め、ロソVORに直行するべく「DIRECT　TO　R」とコンピュータに入力した。ところがこの「R」はコンピュータのデータベースでは、カリのずっと東方にあるボゴタ空港のロメオ・ポイントのことで、ロソV

ORに行くには「ROZO」と入力しなければならなかった。この実行命令を受けたB757はボゴタに向かって左に旋回し始めた。

さらに悪いことに、このような目標地点のデータ変更の結果、現地点から先のカリまでの途中の通過点のデータは、ツルアVORを含めてすべて消えてしまった。B757の飛行管理システムはそのような設計になっていたのである。このため、事故機のパイロットは自機の位置を確認できないまま、山岳地帯に迷い込む原因になった。ボーイング社はそれ以前からこのようなソフトウエアの不具合に気付いて、同様の変更をしても途中の定点が消えないで残るようにソフトウエアの変更を実施中だったが、不幸にしてこの事故機はまだ古いソフトを使っていた。

理由が分からずにコースが左にそれたため、機長は副操縦士に「右へ行け、すぐに、右だ」と指示した。副操縦士は「はい、右へのHDG　SEL（機首方位選択モード）になっています」と答えた。そこから約一分間右旋回を続けたとき、突然、地面接近警報が「テレイン（地面）、テレイン、フープ、フープ」と鳴った。正規のコースは二つの山稜の間の谷間を走っていたが、大きく左旋回したため機は東側の山岳地帯に入り込んでいたのである。パイロットたちはすぐに自動操縦を切って、手動で引き起こして上昇しようとした。ところが上昇は起こらない。スポイラは立ったままになっていて抗力が大きかったから、エンジンの推力を増しても上昇するには不足だった。

山が迫った。「プルアップ、フープ、プルアップ（引き起こせ）」と緊急警報が鳴った。引き起こしたが速度が出ないため、今度は失速を警告して操縦桿が振動し、これは墜落するまで続いた。乗員八人と乗客一五二人が死亡し、四人の乗客と犬一匹が生き残った。

夜間とはいえその日の天候は、五〇〇メートル高度に低層雲が、三〇〇〇メートル高度に中層雲が散在していたが、地上の視程は一〇キロメートルと良く、風は二メートル／秒と弱かった。普通のパイロットなら手動操縦で難なく着陸できたはずである。それが、自動操縦で飛んでいたため状況判断が難しくなり、山岳地帯に迷い込んで、事故を起こしてしまった。

この事故が報道されるや、世界中の航空関係者からさまざまな意見が出された。その意見はおおむね二つに分かれる。

一つはパイロットを批判する意見である。なかでも、退役した海軍パイロットで空母への着艦を昼夜を問わず数百回も行ったというベテランのディロレトという人は、「パイロットの愚かさには打つ手がない。パイロットのエラーから機器の改造へと注意をそらせることにメリットはない」と厳しく批判している。一般に、キャリアを誇るパイロットほど、同業者には厳しい。

他の意見は設計に原因があるとするものである。スポイラが出しっ放しになっていることをパイロットに気付かせるための警報装置を装備すべきだというのがその一つで、連邦航空局ＦＡＡもそのような勧告を行っている。これを受けてボーイング社は、スラストレバーがアイドル位置

から動かされて推力が出ている状態でスポイラが展開されたとき、警報が出るように設計を変更することを計画しているという。

また、飛行管理コンピュータに入力するとき、キーボードからコマンドを打ち込む現在のやり方ではなく、画面に表示された地図の地点を指でさわるタッチセンサにせよ、という意見もある。前著『飛行機はなぜ落ちるか』でも、離陸上昇中に管制からの指示でコースを変更するのに手間取り、間に合わなかった例を紹介したが、最近のある航空雑誌に、米国南部のダラスからヒューストンに飛ぶ四〇分という短時間の飛行で、パイロットがコンピュータのプログラミングが困難になったことが一因となって、この四月に何度かフライトが中止になったという記事が載っていた。高度に自動化されたコックピットには人間と機械を仲介する知能的なインターフェースが不可欠と思われるが、コックピットのなかにはいまだにコンピュータの石頭が威張りくさっている。

パイロットがルートを自ら確認しながら飛ぶ旧来の航法では、この事故は起こらなかったかも知れない。航法までを機械に任せた自動飛行では、巡航中はワークロードが減るので自然に気が緩み、パイロットは状況変化に対する注意を怠りがちになる。いったん途切れた認識の糸を目的地に近付いたとき急につなごうとして失敗した例が、この事故である。

自動化はこの人間性の弱みをカバーするどころか、かえって増幅したのである。

この事故で注目されるのは、航法コンピュータのデータベースと従来の紙に書いた航法チャートで地点標識記号が違っていたことが、事故の一因になったことである。コンピュータに入力されている地点標識記号は、国際的な航空ラジオ会社が作った指針であるＡＲＩＮＣ-４２４にもとづいて付けられている。コロンビアには、Ｒで始まる地点標識はボゴタのＲＯＭＥＯとカリのＲＯＺＯと二つあるが、キーボードで単に「Ｒ」を打ち込めば、大きい方の空港のボゴタのロメオを指す。カリのロソを指定するには「ＲＯＺＯ」と四文字を打ち込まなければならないことになっている。これまでに述べたいくつかの例でも、地上と機上での航法データの入力ミスが事故の一因になった。このカリ空港の事故では、それ以外に、同一国内に同じ頭文字を持つ電波標識が同じラジオ周波数を用いているという制度上の不備も事故の原因になることを教える。

また、厄介なキーボード操作がしばしば異常運航をひき起こし、時によっては事故の一要因になっている。管制塔からの指示に従って着陸の順番待ちをするために待機パターンに入る場合、指定された地点、旋回方向、レグ（旋回パターンの一辺）の長さなどをキーボードに入力するのにかなりの時間下を向いて仕事をするが、この間はモニターやクルー同士のクロスチェックがおろそかになりやすい。そしてやっと入力した命令が実行されたときには、すでに機は指定された地点を通り越してしまったためパイロットが混乱するなど、コロンビアでの事故に似た事態がときどき起こるようである。

　このようなとき、混雑した空港ではニアミスの危険がある。キーボード操作のように頭脳に負担がかかり時間もかかる操作は、机の前で腰を落ち着けてやる仕事であって、目まぐるしく変わる運航環境に対処しなければならないコックピットのなかでやるには向いていない。「パイロットの六割頭」と、昔からよく言われている。

　現在、飛行管理コンピュータで使われているプログラミング・ツールは、今では古典的となったMS-DOS型の逐語文字入力方式である。キーボード入力のような記号操作は、慣れた人でも誤りを犯しやすい。それは人間の弱点に負担をかけるからである。迅速で正確さを最大限要求される操縦のツールが、せめてアイコン（絵）を使った、直感的で分かりやすいアップル・コンピュータのレベルには達して欲しいといった、マッキントッシュ愛好者パイロットからの批判もある。

　ここで述べたような問題は、航空管制方式が、依然として旧世代機に対応していることからもきている。コンピュータ化された新世代のジェット機のコックピットで何が行われているかを知らない管制官が、パイロットがすぐには対応できない指示を出したりすると、当然コックピット内に混乱が起こる。二、三年前に世界で最高の航空安全を誇る米国のペニャ前運輸大臣が「米国の航空交通管制は世界でも遅れている」と発言して話題になったことがあるが、大臣は機材の進歩が速い米国であるからこそ、航空管制の立ち遅れに対し深刻な危機意識をもったのではなかっ

たか。

生き残った機長

事故を起こしたパイロットが二人とも生存して、事故の生き証人になった例はそう多くはない。ましてや、その航空機が安全性をうたい文句にデビューしたハイテク機で、操縦者はそのエアラインきっての名機長とうたわれたひとであれば、なおさらである。

Ａ３２０がフランス航空に就航してまだ間もない一九八八年六月二六日、スイス国境に近いフランスのミュルーズの飛行クラブが会員を乗せて遊覧飛行をした。当日は近くのアプセム空港でエアショウが催されていたので、飛行クラブの希望でその空港の上を飛ぶことになった。初めは滑走路の上空三三メートルを通過することを予定していたが、エンジンの推力を絞って減速したとき、なぜか高度九メートルという地面すれすれにまで降下してしまった。滑走路前方に林があり、それに接触する危険を感じた機長は、エンジンの推力を上げて上昇しようとしたが間に合わなかった。翼が樹に引っかかり、エンジンは木の葉を吸い込んで停止し、墜落した。火災が起こって、乗客三人が死亡し三六人が負傷した。死者のなかにはシートベルトが外れなかったために逃げることができずに焼死した少女も含まれていた。

事故原因の究明が行われた。Ａ３２０にはデジタル・フライトデータ・レコーダ（ＤＦＤＲ）

とコックピット・ボイスレコーダ（CVR）が搭載されている。どちらも火災と衝撃に耐えられるように、またすぐに見つけられるように明色に塗られた容器内に堅固に保護され、衝撃の少ない胴体尾部に納められている。DFDRはICメモリで飛行速度、高度、加速度、ピッチ角、ロール角などの飛行パラメータが一秒ごとに記録される。CVRはコックピット内の乗員の会話や操作音を記録するテープレコーダである。

これらの記録の解読と、シミュレータによる事故飛行のシミュレーション、および同型の実機による事故飛行の再現が行われた。その結果からエンジンも飛行機器も正常に作動したことが確認され、フランス事故調査局はパイロットがあまりにも低い高度を低速で通過しようとし、しかもゴーアラウンドの開始が遅かったのが原因であると断定した。結局、パイロットの操縦ミスとされたのである。

事故機を操縦していたアスリーヌ機長（四四歳）は国立民間航空学校を卒業し、フランス航空で二二年間パイロットを務めた。その間A320の運用技術の開発に参加し、その訓練教官を務めたあと、事故の半年前にA320訓練部長に昇格した。したがって、A320の優れた性能とプロテクションについては、他の誰よりもよく知っていると自負していた。フランス航空ではA320で初めて二人乗務が実施されたが、航空機関士組合がこれに反対したときは、会社の立場を強く弁護して組合と対立し、その憎しみをかったがひるまなかった。アスリーヌ機長はエアバ

ス開発の大義に奉じ、それに献身した。この自負がかえって機体の性能に対する過信を生み、それが事故の遠因になったとも言われている。

一方、マジエレ副操縦士（四五歳）も飛行教官で、A320の運用開発では管理職の立場にあった。

エアショウの華やいだ雰囲気と、たまたまコックピットに二人の非番の客室乗務員が乗っていたことも、機長に心理的な影響を及ぼしたのではないか、と事故報告書では推測している。

計画した飛行高度は三三メートルだった。この高度までは前章で説明したアルファ・フロアが働いて、失速は自動的に防止されているが、実際に飛んだ九メートルの高度では、このプロテクションは働かない。そのうえプロテクションはあくまで航空機の速度やピッチ角が制限範囲を超えるのを防いでいるだけで、この飛行限界領域での安全性余裕が増しているわけではない。とくに、高い迎角で飛ぶと機体の誘導抗力が大きくなり、エンジン推力を絞った状態では上昇は不可能である。A320の性能をいかに高く評価しても、着陸するとき以外は高度三三メートル以下を飛ぶのは避けるべきであった。しかし、このハイテク機の性能に対する過信が、機長の警戒心を鈍らせた。

機長も副操縦士も訓練教官であったが、二人ともデモフライトは初めてだったうえ、アプセム空港を飛んだこともなかった。それにもかかわらず、その朝の準備会に出席しなかったし、フランス航空の職員とも連絡をとらなかった。運航本部はアスリーヌ機長に飛行計画を任せきりにし

ていた。機長は直前に与えられた略式の空港資料を見ただけで、周辺の地形がどうなっているか、エアショウの観衆がどこにいるかも知らなかったから、あらかじめどの滑走路の上を飛ぶかも決めず、現地の状況から判断することにして出かけた。機上での打ち合わせのなかで、機長は副操縦士にこの種の低速飛行は二〇回も経験したと、自信のほどを語った。

機首を高く上げて飛ぶエアバスの姿は、当時の人々に植え付けられた一般的な印象であった。機長は低速で許容される最大の迎角で飛んで、観衆にエアバスの優秀さを印象づけようと意気込んでいたが、滑走路上九メートルという低高度を低速で飛んだ経験はなかった。

高度は最低の九メートルになったが、ピッチ角が大きかったためパイロットの目の位置は後部胴体よりかなり高かった。そのため機長ははじめのうちは高度が極端に下がったのに気づかなかったが、墜落の四秒前になって、やっとゴーアラウンドを開始した。ただし、機長は墜落十数秒前にも推力を中程度に上げる操作をし、最後にゴーアラウンドの操作をしたのは八秒前だったが、エンジンがそれに応答しなかった、と主張している。

ボイスレコーダには九メートルに降下したとき、電波高度計が三度警報音を発したのが録音されていた。機長がそれを聞いていれば、もっと早く上昇のためのスロットル操作をしたであろう。しかし、その警告音は機長には聞こえなかった。なぜなら、コックピットの遮音特性が悪くて床下の冷却ファンや電気室の騒音が高かったのでヘッドホンをして対話していたが、そのヘッ

ドホンの回路には高度計の警報が流されていなかったからである。
このとき高度データはもっぱら気圧高度計に頼っていたが、地面のごく付近ではこの計器の指示の応答の遅れと誤差は無視できないほど大きい。機長はこの気圧高度計の過大な誤差も事故原因の一つであると主張している。

最終報告書によると、電波高度警報が三度鳴ったあと機長は墜落の四秒前になって推力を上げるためスラストレバーを押した。エンジンは正常に作動したが回転数がアイドル状態（二九パーセント）から八三パーセントまで上がるのに五秒かかった。したがって、その間は機体はほとんど上昇せず、樹木と接触するのを避けられなかった。この機長の操作ミスが事故の直接の原因であるというのが、報告書の結論である。

フランス航空は国営企業であるし、エアバス社は各国の保証を受けた国際合弁会社である。エアバス機の世界的なセールスを強力に展開していたフランスにとって、これほど大きなつまずきとなった事故の当事者である機長を、そのままにしておくことはできなかった。そうすることは、A320が技術的に問題があることを認めることになりかねない。当時のミッテラン・フランス大統領も、閣議で他のパイロットの戒めになるよう制裁を加えよと発言した。ここに至ってアスリーヌ機長の命運は決まった。彼は八年間免許を剥奪され、退職金もなくフランス航空から解雇され、職を求めてアメリカに渡った。さらに彼は殺人罪で訴えられ、六ヵ月の実刑判決を受

けたが、上告中である。

事故調査報告書は「機体にはなんの異常もなく正常に作動した。原因は機長がエアバスの性能と安全性を過信したことにある」と断定している。とくに、プロテクションは航空機が飛行限界を超えるのを防ぐことはするが、その限界領域で性能が著しく悪くなるのは、従来型機となんら変わりないことを強調している。そして、「従来型機の訓練ではパイロットに低速飛行の危険性に気付かせ、最小速度からの余裕を監視するという基本ルールを頭にたたき込んだものだった。だから、旧型機のパイロットは失速近い速度でそのようなマヌーバ（運動するための操縦）をすることは考えなかっただろう。しかし、事故機のパイロットはこの危険を悟らずに、通常の最小操縦速度V_{MC}（この速度以下では空気力が小さいから、ラダーの効きが不足し、機体の方向維持ができなくなるぎりぎりの速度）より低い速度で滑走路上を通過することを躊躇（ちゅうちょ）しなかった」と批判している。

最初、アスリーヌ機長は身の潔白が証明されることを期待して発言を控えていたが、会社からは解雇され、事故調査委員会の結論が「飛行機以外はすべてクロ」というに近いものであることを知るや、自己の立場を公に弁護し始めた。機長は分厚い著書『エアバスA320は、なぜ墜ちたか』（前出）を出版し、そのなかで「エアバス社のマニュアルには『大きな迎角で（非常な低速で）飛行させたいと望むなら、そうすることができる。そのための唯一の操作は操縦桿を目い

っぱい引いたままにしておくことだけで、その後の安全はすべてコンピュータが保証してくれる』と書いてある。これがA320は絶対に失速することはあり得ない、という考えをパイロットの心の奥底に植え付けた。……電子制御装置による操縦という新しい特性がなかったら、私は決してあのような選択をしなかったはずだ。……われわれは、誤ってプロテクション装置に対する過度の信頼を育み、安全余裕の幅の遵守をコンピュータに委ねた」と告白している。それまで教官として訓練生に教えてきたことを自ら批判したのである。

アスリーヌ機長はフレア・モードも問題にしている。フレア・モードとは、第一章で説明したように、着陸の直前に機体が地面に近付いたとき、自動操縦のコンピュータは次第に機首を下げるような指令信号を出す。パイロットはそれに逆らって引き起こさなければ正常な着陸は行われない。この引き起こし（フレア）が遅れるとドシンと接地してしまう。この自動操縦システムの地面効果を模した不自然な振舞いは、従来型機を操縦し慣れたパイロットたちを戸惑わせる。最新のB777でもこれと同じように、地面効果を着陸モードの制御に入れているが、初めてこれを経験したパイロットは、この機体の「演技」にだまされたような気がするという。アスリーヌ機長も、「初めてA320を操縦して着陸したとき、このスティック操作に対する機体の反応が気にかかった」と著書に書いている。

機長は事故のときこのフレア・モードが働いたと信じており、「エレベータがパイロットの操

舵に従わなかったことが事故原因の一つだ」と主張しているが、事故調査報告書ではこのモードは作動状態にはなく、パイロットのエレベータ操舵が遅れたことを事故原因としている。

いずれが正しいにしても、コンピュータが陰で操縦しているハイテク機では、旧型機と違ってコンピュータが高いオーソリティ（権限）を持ち、パイロットのオーソリティは低く抑えられているから、機体はパイロットの操舵にそのまま反応しないことに注意する必要がある。

過剰な保護

「過ぎたるは及ばざるが如し」というが、一九九四年九月二四日にパリのオルリー空港で起きたハプニングは、速度プロテクションのやり過ぎはかえって危険であることを示した異常運航である。

その日、ルーマニアのブカレストから到着したタロム航空のエアバスA310型機は、悪天候の中をオルリー空港に向かって進入を開始した。高度五一〇メートルになってフラップを二〇度に下ろしたとき突風が吹いて、対気速度（飛行速度と風の速度を加算した、機体に当たる流れの速度）が一時、フラップ展開最大速度V_{FE}を二ノット（約一メートル／秒）超過した。

V_{FE}を超えてフラップが開いていると過大な空気力がかかり、それが繰り返されるとフラップ支持機構が疲労して壊れるおそれがある。

しかし、一時的に二ノットくらい速度がオーバーしたからといって、フラップが直ちに壊れるわけではないから、すぐ何かをしなくてもよい。だがそれは人間の考えで、コンピュータは馬鹿正直であるから、すぐさま自動操縦のモードをそれまでの垂直速度（ＶＳ）から高度を上方に変更するレベルチェンジ（ＬＶＬ／ＣＨＧ）に切り替えた。Ａ３１０は猛然と上昇に移った。

このようにモードが自動的に切り替わることをモード・リバージョン（逆もどり）という。パイロットが誤った操作をしたとき航空機が危険な運動に入るのを防ぐために、自動操縦システムにあらかじめ組み込まれている機能である。これについては、後述の「モード混乱」の項でまとめて説明する。

このモード変化に気が付かないタロム航空のパイロットは、驚いて、降下を継続しようとしてエレベータをスタビライザとは逆に機首下げ側に操舵したから、尾翼は前に述べた「への字」になった。パイロットと自動操縦システムの綱引きが始まった。しかし、スタビライザの効果はエレベータの効果を二倍も上回るから、ピッチ角は五九度にまで上がり、高度一二〇〇メートルまで上昇し、そこで失速したのち、高度二五〇メートルまで落ちた。

このときは、パイロットがエレクトリック・トリムという、自動操縦とは別系統の、電気モータで直接スタビライザを動かす系統の押しボタンを操作して、「への字」形を解消することができたので、二度目は着陸に成功した。

このように、コンピュータは教えられたことには忠実に、ただしことの大小はわからず、文字どおり機械的に反応する。このタロム航空の例はモード切り替えという過剰な反応を起こし、それがかえって危険を招く結果になった。この場合まずパイロットにそれを知らせ、判断させてもよい性質のものだった。しかし、エアバス社は緊急時の操作をパイロットに任せることをしなかった。

ボーイング社はこのフラップ・オーバースピードの対策として、フラップを安全な角度まで戻す方法をとっている。同じ自動化に頼るのなら、モードを急に変えるよりはこの方がずっと無難である。

機械に頼る心

多くの事故例が示すように、自動操縦システムは計画された運航を正常に遂行するには向いているが、異常な事態にはうまく対応できない。緊急のときパイロットが自動操縦に頼ろうとすると、かえって危険な事態に陥る。アメリカの航空宇宙局のウィーナー博士は、通常はオートパイロットを使うことを強調する一方、訓練でオートパイロットをいつ切るかについて十分に教えていないことを問題にする。博士はある年輩のパイロットの「私が最初訓練を受けたときには教官はどのスイッチも入れさせなかったが、今ではどれも切らせようとしない。混乱が起きたときの

最善の策は、オートパイロットを切って古いB727のように飛ばすことだ。なにが起こっているかがわかるまでは、普通の航空機のように飛ばせ」という言葉を引用している。しかし、機械に対する依頼心を植え付けられたパイロットは、しばしばこの重要な決断をためらう。一九九五年三月三一日に起こった、同じタロム航空のA310型機がブカレスト空港を離陸した直後墜落した事故は、このことを教える。

このエアバス機のエンジンは、推力が自動的に調整されるオートスロットル・モードになっていた。離陸後フラップを引っ込めエンジンの出力を上昇推力に減らそうとしたとき、右エンジンのスロットルはわずか動いただけで引っかかってしまい、推力はあまり減らなかった。一方、左エンジンの推力は徐々に減り、四二秒後にはほとんどアイドル（回転数が低く推力が発生しない）の状態になった。

こうして左右の推力がアンバランスになったため機首は左を向き、そのためローリングが起こって左に四九度バンクした。その後もローリングは止まらず、機体は左に一七〇度以上バンクし、ほとんど逆さまになり、機首も八〇度に下がった。副操縦士は藁をもつかむ気持ちで自動操縦に頼ろうとして機長にスイッチを入れてもらったが、自分はスティックを大きな力で引いたので自動操縦は切れてしまった。

そのときまでパイロットがラダーとエレベータを操舵した証拠はなく、エルロンも五〇パーセ

ント程度しか使っていなかったが、この時点からパイロットは操縦舵輪を右に左に大きく操作した。しかし、こうなってからではどんな操舵をしても機体姿勢をもとに戻すことはできなかった。結局機は墜落し、四九人の客と一一人の乗員全員が死亡した。

エンジン・スロットルの作動不良がこの事故の端緒であるのは確かだが、その後推力のアンバランスの致命的な効果が現れるまでには四〇秒も時間があった。その間にパイロットは事態の悪化を防ぐために有効な手を何も打たなかった。最後の段階まで途方に暮れ、ひたすらに自動操縦に頼った姿が想像される。

エアバスインダストリはこの事故のあと、A310とA300―600を運用する航空会社に対して、「離陸中、推力がオートスロットルになっていても気を許すことなく、離陸推力から上昇推力へのオートスロットルの動きをモニターし、異常の発見に努めること。そして故障が発見されたら、スロットルレバーに付いている直感的スイッチでオートスロットルを解除したあと、手動でエンジン推力をコントロールしなければならない」という安全警告を発した。

これまでの例が示すように、自動化の過信が機械への依頼心を生み、警戒心を失わせ、人間が果たさねばならぬ基本的な役割を忘れさせた。自動化は、今、パイロットが守る「航空安全の最後の砦」を突き崩しつつあるのだ。

中国で二〇〇〇年以上も前に書かれた思想書『荘子』の天地篇に、井戸の中から苦労して瓶(かめ)で

水を汲み上げ畑に注ぐ一老人の話が語られている。孔子の弟子の子貢がそれを見て、跳ねつるべを使うよう勧めたとき、老人は次のように答えた。
「機械を持つものには必ず機械に頼る仕事がふえる。機械に頼る仕事がふえると機械に頼る心が生まれる。機械に頼る心が胸中にあれば、自然のままの純白の美しさが失われ、霊妙な生命の働きも安定を失う。これは本当の思慮分別とは調和しない」
これを聞いて子貢は呆然自失して立ち去った。あとで子貢からこれを聞いた孔子は、「それは心の内を治める道だけを知るもので、外の世界に処する道ではない」と批判したという。
『荘子』は天地自然のままに生きることを説いた教えである。機械文明の今の世のなかで機械を一切使わないのは非現実的で、孔子のいうのはもっともである。しかし、機械に頼り過ぎるなという戒めは今日でも通用する。頼りすぎて思慮分別を失う人間の本性は、今も昔も変わらないからである。

詰まったパイプ

自動操縦に頼って純白な心を失うということは、現状を正しく認識することができなくなることである。頼る心があれば警戒心も失う。最近、中米のドミニカとペルーで起こったボーイングB757の事故は、自動操縦システムが誤った表示を出したにもかかわらず、パイロットがそれ

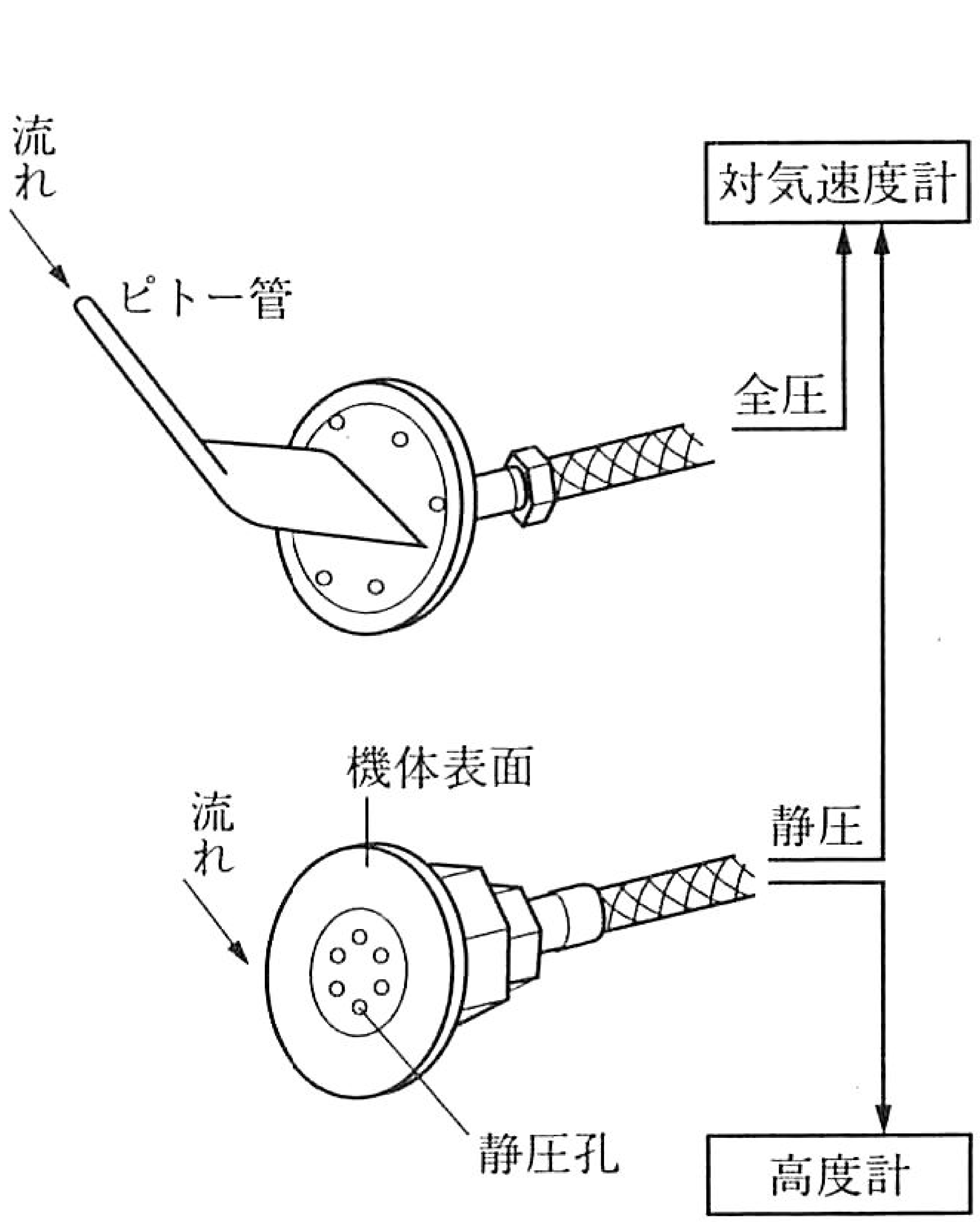
を疑わなかったために起こった。

ドミニカはカリブ海のなかの保養地で、ヨーロッパからの観光客も多い。この事故は帰国するドイツ人観光客を乗せた、ビルゲン航空所属のＢ７５７型機で起こった。この便はドミニカの航空会社アラスナシオナレス航空が運航していた「ラストミニッツ」と呼ばれる出発間際でも空港で申し込める格安ツアーのチャーター便で、一九九六年二月六日、ハイチのプエルトプラタを出発した。

当初、この便にはＢ７６７型機が使われる予定であったが、機材が整備不良のため飛ぶことができず、急いでトルコ籍のビルゲン航空から、このＢ７５７型機がリースされた。離陸するときパイロットは機長席の速度計の指示がおかしいことに気付いていた。この速度はピトー・静圧管という計器で計った対気速度である。

対気速度は、普通、ピトー管を使って求める。次に、この風速計の原理を簡単に説明しておく。

台風の風をまともに受けたガラス窓には大きな圧力（風圧）がかかるように、管を風の方向に向けると、先端の孔のところの圧力は高くなる。航空工学ではこの圧力を全圧と呼ぶ。この全圧とその飛行高度での大気圧の差（差圧）は、動圧と呼ばれる。ピトー管式対気速度計は、この動圧が速度の二乗に比例することを利用したものである。しかし、飛んでいる航空機上では大気圧



（注）ピトー管に静圧孔をあけて静圧を取り出すもの（ピトー・静圧管）もある

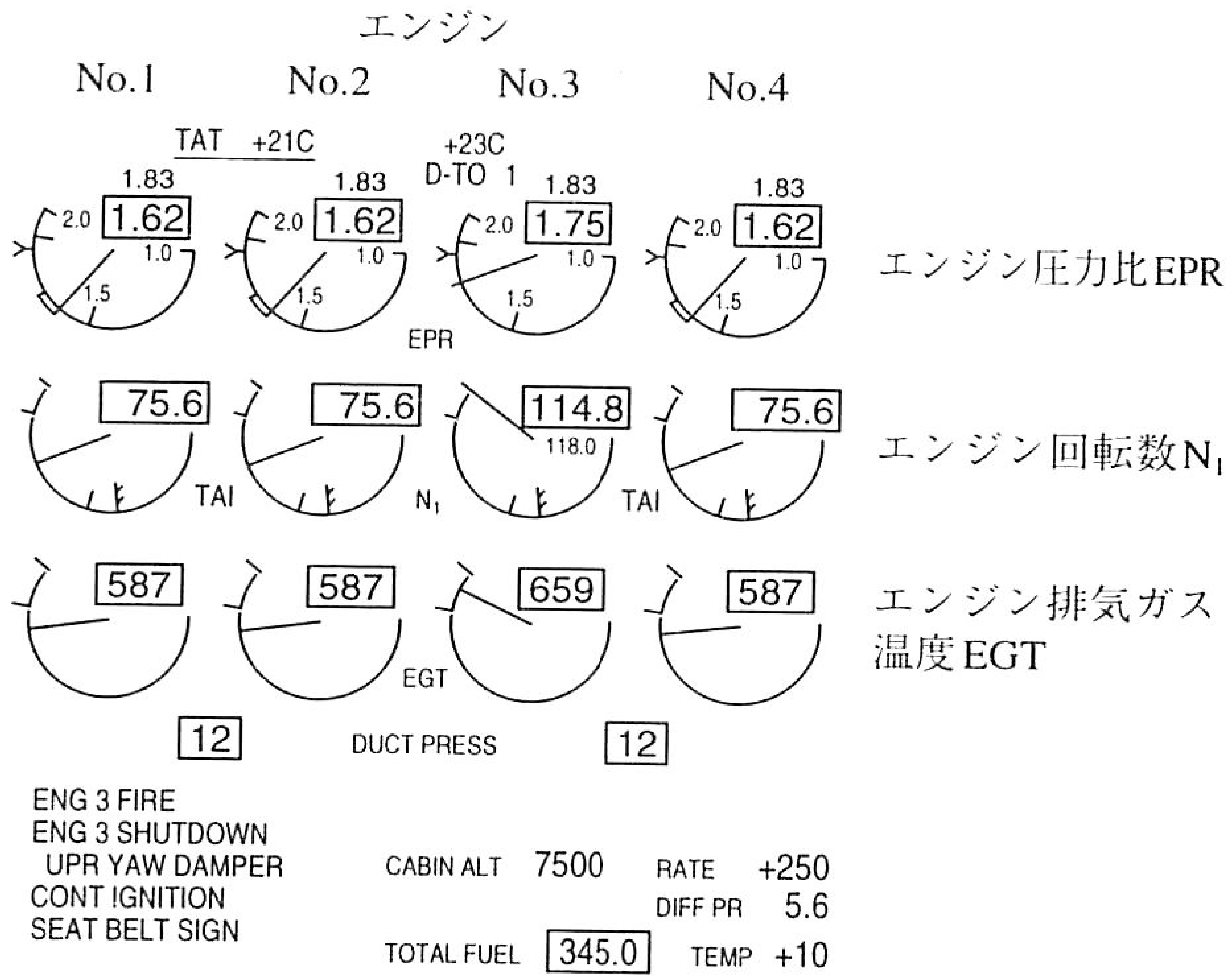
図 2–4　ピトー管式対気速度計

を計ることはできないから、胴体の側面に開けた孔から大気圧に近い圧力を取り出して使用する。この圧力を「静圧」という（図2―4）。ピトー管の側壁に開けた孔から静圧を取り出す方式の、ピトー・静圧管というものもある。

通常、速度計は正、副と予備の三系統が装備されている。

実は、このビルゲン航空のB757は、そのときまで二週間もプエルトプラタ空港に置いたままになっていたが、その間三本あるピトー管の先端にカバーをかけてなかったので、その一本にごみが詰まっていたらしい。

離陸して二分後、中央の自動操縦システムが自動的にエンゲージ（使用状態）になった。B757の自動操縦システムは、中央と左右の三重系になっている。その中央の系統は詰まったピトー管からの全圧を使っていたが、パイロットはそれを知らなかった。だんだん高度が上がってく



第3エンジンのEPR, N_1, EGTともに異常に高い値を示し、左下の警告メッセージ「ENG 3 FIRE」が赤く輝いている

図2-5　エンジン計器表示・クルー警報システム（EICAS　B 747—400の例）

ると静圧は下がっていくから、差圧は過大な値となり、そのため中央の自動操縦システムの速度計は三五〇ノット（時速六四八キロ）という大きな値をコンピュータに入力した。そこで自動操縦システムは速度を減らすため、機首を上げエンジンのパワーを絞った。EICAS（図2―5に示した、エンジンのパラメータを表示したり、パイロットに対して警告をグラフィック表示する装置。左右の操縦席の間にある）の画面にはピトー管の不調を知らせるメッセージは出ないが、その代わり「ラダー・レシオとマッハ数／速度に注

意するよう」というメッセージが出た。この「ラダー・レシオ」というのは、高速になるとラダー（方向舵）の効きが増すので、その操舵に対し機体が過敏に反応するのを防ぐため、ラダーの動きを制限しなければならないことを警告するメッセージである。

副操縦士側の速度計は二〇〇ノット（時速三七〇キロ）を指示していた。こちらのほうは正しかったから、この警告は見当違いのメッセージだった。ところが、機長はこの正しい速度表示を無視して、警告に従って速度を落としたから、今度は失速警報が鳴り、スティックシェーカ（操縦桿がぶるぶる震えて失速を警告する）が作動した。この失速警報はピトー管の速度からではなく、流れの迎角をアルファ・ベーンという風見羽根で計り、その角度が失速迎角に近付いたとき警報を出す。高速で飛んでいると思っていた機長は混乱して、「何だ、俺はどうすればいいんだ」とうめき、失速から回復しようとして「スラスト（推力）、スラスト、スラスト」と叫び、副操縦士が「はい、開きます」といってエンジン・スロットルを開いて最大推力を出そうとした。この処置は正しかったが、遅過ぎた。

機は失速して操縦不能に陥り、高度二二〇〇メートルから急降下した。地面接近警報が鳴った。機長の「おー、何が起こっているんだ？」という声を最後に、機は一八九人の乗員乗客もろとも海中に突っ込んだ。

離陸中に速度計の異常に気付いていながら、マニュアルやチェックリストを参照して原因を究

明しようともせず、予備の速度計と比較もしなかった。この基本的な手順違反が事故の主な原因になった。ある雑誌でこの事故についてコメントした一機長は、「速度計の指示が高いのに失速警報が出た。何をすればよかったのか。姿勢指示計を見るだけでよい。機首上げ／高迎角を示していたはずだ。機首を下げる、こうすればスティックシェーカも止まるし、降下は阻止される。……いくら飛行管理システムがあっても、ただ一組の数値がバランスを保っていれば飛行機は飛べるのだということを、パイロットは忘れるべきではない」といっている。

もう一つのB757型機の事故は、その年の一〇月二日にペルーで起こった。ペルー航空のB757型機がチリに向けてリマを飛び立った、空港の管制官に速度計と高度計の指示が異常なことを伝えたあと、引き返す途中でペルー西方沖の海中に墜落した。乗員九名と乗客六一名全員が水中で死亡した。

ペルー航空は一九九三年に民営化され、今はCINTRAグループのアエロメヒコによって経営され、整備もこの会社が行っていた。この事故は米国政府とペルー政府との間で航空問題で政治的な紛争が起こっていた時期に発生しただけに、両国が共同で行うべき事故調査は困難に直面した。その政治問題というのは、米国が当時推進していた、各国政府の航空会社に対する監督能力を査定し、その結果が悪ければその国籍を有する航空機の米国乗り入れを制限、または禁止するという国際安全査察であった。米国の連邦航空局はこれをなんらの国際協定にも基づかずに行

っていた。米連邦航空局はペルー政府の航空局のスタッフの熟練度と資材の不足を問題にして悪い評価を下し、これに対してペルー政府が反発した。事故原因がペルー航空のパイロットにあるとすれば、ペルー政府はますます不利な立場に追い込まれる。

結局、飛行計器に異常があったことが、事故の原因と分かった。

なぜ、飛行計器に異常が起こったのか。航空機のコックピット内の計器盤に表示される速度は、前述した通り、ピトー管の全圧と静圧の差圧から計算した対気速度である。この静圧はB757の場合は胴体側面に開けた静圧孔から大気の圧力をパイプを通して取り出して計る（図2−4）。引き上げられた機体の残骸を調べてみると、ピトー管式対気速度計の静圧孔にテープが貼られたままになっていた。このB757はリマを飛び立つ前日に、右翼エンジンを修理している。その間に機体の清掃が行われ、塗料が詰まらないように静圧孔をテープで覆った。エンジンの取り付け作業が始まったため整備員は清掃を止めたが、テープを剝すのを忘れ、そのままにした。

翌日、出発するまえにパイロットが機体のまわりを一周して異常がないかどうかを点検することになっているが、この静圧孔を覆ったテープには気が付かず、そのまま離陸を始めた。

高度計は、静圧孔からの静圧を標準大気という世界共通（ICAO）の仮想的な大気の中の気圧・高度関係にもとづいて、高度に変換して表示したものである。フィートで表示されているが真の高度ではなく、実体は気圧であるから、気圧高度と呼ばれている。したがって、航空機は離

着陸するときなどの低空では電波高度計を使うが、高空では高度計を切り替えて気圧高度を一定に維持して飛んでいる、つまり、等圧面（大気圧の等しい面）の上を飛んでいるのである。だから、もし気圧計に誤差があると、対向機との高度差が狭くなって、危険である。

この事故機が離陸したときは、静圧孔に詰まっていた空気の圧力は地上の大気圧とほとんど変わらなかったから、コックピットの計器盤の表示もコンピュータに入力された高度も、ほぼ空港の高度を示していた。それで離陸は支障なく行われたが、高度が上がってくると大気圧はどんどん下がってくるのに、静圧は孔が塞がっていたため徐々にしか変わらなかった。そのため、前に説明した差圧は正しい動圧より小さくなり、計器が表示する速度は真の値よりも小さくなって、失速速度に近づいた。離陸から五分後、スティックシェーカが作動して失速を警告した。パイロットは速度計と高度計が異常なことに気づいて空港に引き返そうとした。

ペルーのリマ空港の東側にはアンデスの山並みがある。それで、飛行中問題が発生した航空機はその問題が解決するまでは、山との衝突を避けて西側の海の上を飛ぶことがよくあるという。このB757の場合も海上のコースをとった。空港に向かって旋回した後、パイロットは管制塔に自機の高度を尋ねた。ところが、管制塔でも事故機からトランスポンダで送られた故障した気圧計の値を使っていたから、この地上からの助言もなんの助けにもならなかった。静圧配管に詰まっていた空気もそのときまでには次第に洩れて、〇・八気圧程度に下がっていた。この気圧は

ICAOの標準大気では六〇〇〇フィート（一八〇〇メートル）の高度に相当する。パイロットは管制官から告げられた六〇〇〇フィートという高度を信じて降下を始めた。しかし、テープのため今度は静圧が過小に測定され、高度計は真の値より高い値を示した。
高度は海面すれすれにまで下がり、ついに翼端が海面の波を切ってエンジンがもぎ取られ、機はもんどり打って海中に突っ込んだ。
捜索は霧のため難航した。フジモリ大統領も自ら海軍機に乗って事故現場の上空を飛んだ。機体の残骸は岸から六五キロの海上に散らばっていた。
どんなに自動操縦装置が進歩しても、コンピュータは計器の誤りには対抗できない。この事故の場合、高度六〇〇〇フィートという計器の指示は、物理的には誤りであっても論理的なエラーではないから、コンピュータにはそれが誤りとは判断できない。パイロットならどうか。機長側の速度計は三五〇ノット以上の高い値を示していたのに、速度が低いことを警告するスティックシェーカが作動した。パイロットはこの矛盾の原因はピトー・静圧の系統ではないかと疑わなければならない。それに気付けば高度確認の手段はほかにもあったはずである。
いずれにしても、パイロットを「航空安全の最後の砦」という意味は、「パイロットが判断し行動しなかったら、あとがない」ということなのである。

モード混乱

これまで「モード」という術語を各所で使ってきたが、ここでそれを説明しておく必要がありそうだ。モードは情報処理技術とともにコックピットに持ち込まれた。

かつてコックピットはパイロットの聖域であったが、操縦の自動化が進むと、今度はそこはシステムエンジニア（ソフト設計者）のプレイ・グラウンドになった。この人たちの思考形式は幾何学的である。すなわち、航空機の運動から空気力やエンジン推力などの動力学要因を捨象し、その結果としての運動をいくつかの基本的な幾何学的パターンに分け、それからモードを構成した。例えば、縦（上下）方向の運動では、「ＡＬＴ」はある高度に達したあと、その高度を一定に維持して飛ぶモード、「ＰＡＴＨ」はある角度だけ傾斜した飛行経路に沿って飛ぶモード、「ＶＳ」は一定の率で上昇または降下するモードである。

横（左右）方向のモードには、針路（機首方位）を一定にして飛ぶ「ＨＤＧ（針路）」モード、地上からの二つの誘導電波のうちのローカライザが作る垂直波面内を飛ぶ「ＬＯＣ」モード、また地図上のいくつかの定点を結ぶルートをたどるより高度な横方向ナビゲーションモード「ＬＡＴ　ＮＡＶ」などがある。表２―１にボーイング系の基本モードを挙げ、簡単に説明した。この表には比較のため、エアバスＡ３２０の基本的な運航モードを示した。メーカによって呼び名は違うが、本質的な違いはない。

モード	機　　能	類似するA320のモード
1. オートスロットル・モード	エンジン·スロットルを調節して推力を自動制御する	
THR	推力制御モード：高度変更モードFLCHや復行モードGAのとき、コンピュータが計算した垂直速度V/Sを維持するために必要な推力を出す	FLEX42 MCT
THR REF	基準推力保持モード：エンジンの推力をパネルに表示された設定推力に保持する	CLB IDLE
IDL	アイドル：エンジン·スロットルをアイドルまで絞る	THR
HOLD	推力保持モード：離陸時、速度がある値を超すと、スラストレバーが手動で操作できる状態になる	SPEED/ MACH
SPD	速度保持モード：最大および最小の速度限界を超えない範囲で、プライマリ·フライト·ディスプレイに表示された指示対気速度IASまたはマッハ数MACHを保持する	
2. ロール・モード	飛行方位を自動制御する	
LNAV	横方向ナビゲーション：機の位置が飛行しようとするコースから横向きに2.5カイリ以内にあるとき、そのコースを捕捉する	NAV HDG/ TRK
HDG SELECT	針路選択モード：モード·コントロール·パネルにセットされた新しい針路まで旋回した後、その針路を保持する	LOC* LOC/ APPNAV
HDG HOLD	針路保持モード：このモードがエンゲージされると、その時の針路を保持する。旋回中なら、翼を水平に戻して、バンク角が3度になったときの針路を保持する	
LOC	ローカライザ・モード：地上のローカライザから発せられる誘導電波を自動的に捕捉して追跡し、グライドスロープを使用せずに進入を行う。ただしスイッチが入れられたときに飛行方向とローカライザの交差角が120度を超えていると、捕捉は行われない	
3. ピッチ・モード	ピッチをコントロールして速度、上昇率／降下率、および経路角の自動制御を行う	
VNAV	垂直ナビゲーション・モード：高度400フィート以上でコンピュータに入力されたデータに従って上昇、降下する	SRS CLB
VNAV SPD	垂直ナビゲーション・モード(速度)：コンピュータが指示する速度を維持して上昇、降下を行う	DES ALT V/S-FPA
VNAV PATH	垂直ナビゲーション・モード(経路)：FCUで選択された飛行経路角を保持する	GS- FINAL
VNAV ALT	垂直ナビゲーション・モード(高度)：FCUで選択された高度を維持するようピッチ姿勢をコントロールする。推力はオートスロットル·モードのSPDでコントロールされる	

表 2-1　B 747-400 の基本モード（A 320 との対比）

表2-1（続き）

モード	機　能	類似するA320のモード
V/S	上昇速度モード：FCUにセットされた上昇率で上昇、または降下する	
FLCH SPD	飛行レベル変更モード：FCUにセットされた新しい高度に上昇、または降下する。 その高度に達したあとは、SPDモードによって推力がコントロールされる	
ALT	高度保持モード：スイッチを押したときの高度を保持する	
ALT SELECT	高度選択モード：モード·コントロール·パネルで高度をセットすると自動的にエンゲージし、その高度に達するとALTモードになる	
4. 共通モード	推力、ピッチ、ロールのすべてをコントロールして特定されたミッションを行う	
TO	離陸モード：離陸後上昇率が600フィート／秒に達するまではピッチ姿勢を8度に保ち､上昇率が1200フィート／秒に達すると､速度をV_2＋10ノットに保持する	TOGA LAND FLARE
GA	復行モード：スイッチが入ったときのトラック（航跡）を保持しながら復行を行う。速度はモード·コントロール·パネルにセットされた速度と、それより25ノット高い速度の間にコントロールされる	
APP	進入モード：ローカライザとグライドスロープの両方の誘導電波を使って進入し、自動着陸する 横風があってクラブで進入するときは、電波高度が500フィートからデクラブを開始する。電波高度が40〜60フィートの間でフレアを行う	

エラーの種類	件数	エラーの説明
プログラミング·エラー	84	誤ったデータ入力とモード選択。すぐには気がつかず、予想しないモード、モード変化、あるいは逸脱が起きた
モード転移の問題	36	自動飛行システムが予想外のモード転移を行ったか、予期したモード転移を行わなかった
自動化の理解不足	33	クルーが行為をする、あるいは、しないことの結果を十分理解しなかったので、混乱が起こった
自動化システムの故障	23	システム自体の故障
クルーの協調	25	間違ったモード、モード転移、あるいはパラメータの状態を推定させたことから始まったイベントの結末
データベースエラー	12	飛行管理システムのデータベースのエラーによってクルーが不正確な手順を実行するか、あるいは自動飛行システムの命令の妥当性を疑った
不明	28	以上の分類のどれにも該当しない､モード認識上の問題

表 2–2　モード混乱に関連したインシデント

パイロットは自動操縦システムに自分の意図を伝えるために、モードを選択する。しかし、自然界には乱気流やウインドシアのような急激な風の変動現象があり、航空機の運動性能はそれに対抗するには必ずしも十分ではないから、モードによって理想化された運動からの逸脱が起こることがある。その場合パイロットは自動操縦システムのスイッチを切って手動で操縦するか、オーバーライドの機能が備わっていれば、それを使って修正操舵を自動操舵に重ね合わせなければならない。この操縦の引き継ぎの時が問題なのである。つまり、それまでの自動操縦の設計コンセプト（考え方）がパイロットが持っている操縦イメージと合っていれば問題は少ないのであるが、このコンセプトは操縦はおろか飛行の経験もほとんどないシステムエンジニアによって作られているのだ。

ここに、次の章でも述べる「フレーム」の問題がある。つまり、人間は自分の経験の枠を超えられないということである。さらに、ソフトを作る人々が使用するプログラミング言語は、人間の頭脳には馴染みにくい論理記号である。そのうえ、コンピュータはパイロットに厳格な逐次処理を要求し、それ以外の入力は受け入れないから、緊急の場合間に合わない。

コンピュータから与えられる情報が階層化されているのも、混乱が起きる原因になる。パイロットに最初に提示される情報は、いまどのモードで飛んでいるかといった最上階層の情報であるから、さらに具体的な下層のデータ（生データなど）が欲しい時は、それに応じたその次の操作

が必要になる。この関係が複雑で、よく理解されていないと混乱が起こる。要するに、コンピュータとパイロットとのコミュニケーションがむずかしいのである。

事故が起こったときだけセンセーショナルに報道されるが、実際には、モードで処理できない正常運航からの逸脱はしょっちゅう起こっている。それが大きな事故にならずに済んでいるのは、パイロットの手動操縦の機能が残されていて、それを使って修正操舵が行われ、無難に処理されているためである。自動操縦といっても、運航の安全は人間パイロットの柔軟な適応能力を前提にしなければ成り立たないのである。

しかし、自動操縦からパイロットの手動操縦への引き継ぎが、いつもうまくいくとは限らない。システムの動きを十分に認識していないと、自動に切り替える際操舵が不連続になったり、時には誤操作さえも起こる。要するに、現在の自動操縦システムは正常な運航を管理する場合には問題を起こさないが、異常な運航を処理しようとする時その欠陥を露呈する。

NASAの航空安全報告制度（ASRS）はこのような隠された真実に光を当てる。パイロットからの自発的情報提供を促すため、秘密保護、匿名、免責などの条件のもとに、パイロット個人から異常運航のデータを収集・分析し、その原因解明に役立てることを目的とする制度である。マサチューセッツ工科大学のハンスマン教授はそのデータを使って、モード混乱に関連したインシデント（異常運航があっても事故には至らなかった事例）を分析した。一九九〇年二月か

ら一九九四年一月までの報告のうち一八四件がモード混乱に関連したインシデントで、これをエラーの種類別に分類すると表２―２のようになる。

これを見ると、プログラミング・エラーとして分類されている、キーボードから数値や記号をコンピュータに入力するミスと、操作パネル上の押しボタンを押してモードを選択する際のエラーが飛びぬけて多い。つまり、コンピュータとパイロットの間のインターフェースに問題が多いことがわかる。

モードのわかりにくさについて、オハイオ大学のウッズ教授らの調査がある。教授はＢ７３７―３００のパイロットが離陸を中断するときどのように判断し行動するかを、経験ある一四名と移行訓練終了直前の六名のパイロットを対象として、アンケート調査し、また、シミュレータ訓練を観察した。

ボーイング系のハイテク機では離陸するまえに自動操縦システムをオートスロットル・モードにしておくと、離陸滑走し加速して六五ノット（時速一二〇キロメートル）になるまでは、エンジンの出力は自動的に離陸推力（普通、エンジンの最大定格推力）まで上がって、そのまま保持される。六五ノット以上に加速したあとエンジンのモードがホールドモード（ＨＯＬＤ）に変わって、はじめてスロットルレバーはクラッチによって自動推力制御のサーボモータ（図２―６）から切り離され、パイロットが手動でスロットル操作ができるようになる。

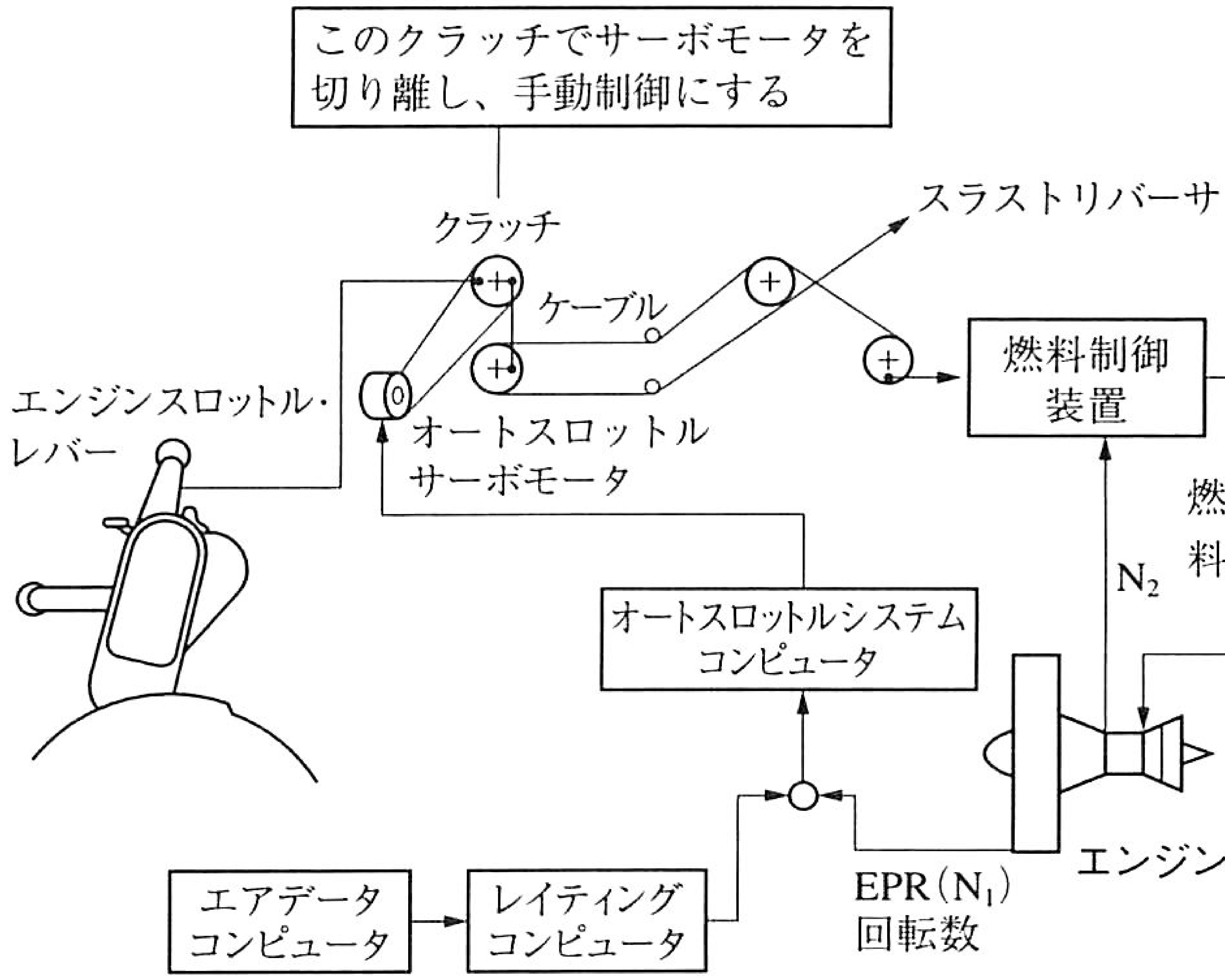


図 2-6　スロットル駆動機構

　したがって、離陸滑走を始めてから速度がまだ六五ノットに達しないとき、何かが起こって緊急停止しようとする場合には、パイロットは手動で推力をゼロにしようとしても、自動スロットル装置はそれをまた離陸推力に戻してしまうから、滑走路をオーバランしてしまう危険性がある。手動でスロットルを操作するためには、まず、オートスロットルのスイッチを切らなければならない。調査対象の二〇人のパイロットに四〇ノット（時速七四キロメートル）のとき離陸中止するにはどうするか、と尋ねたとき、一六人が「スロットルレバーを引く」、「逆噴射する」、「手動ブレーキをかける」、などと答え、肝心のオートスロットルのスイッチを切ることを知らなかった。

この一六人に対し「オートスロットルはどうするか」と問題を絞って尋ねたときでも、正しい操作に気が付いたのは一六人中たった三人だったという。

ウッズ教授は「このようにパイロットにはモード認識が欠けており、自動化機能のアーキテクチャ（構成）についてのメンタル・モデル（パイロットが頭のなかで描いている自動化のイメージ）と現実の自動化システムの作動との間にギャップがある」と指摘している。しかし、このようなギャップが起こる最大の原因は、このような「モード・トランジション（転移）」がコントロール・ソフトのところどころに組み込まれていて、それがパイロットが知らないうちに起こることである（図2―7）。

エアバスA320では着陸のときに、高度が下がるにつれてCスター・モードからピッチ維持モードへ、その後デローテーション・モード（自動的機首下げ）へと目まぐるしくモード・トランジションが起こることは、この章の前半でアプセム空港での事故の項で説明した。

見えないモードの動き

モード混乱が起こっているのはエアバス機に限らず、ボーイングの航空機の運航でも起こっている。次の異常運航は、その一例である。

一九九四年六月二一日のこと、英国のマンチェスター空港からブリタニア航空のB757型機

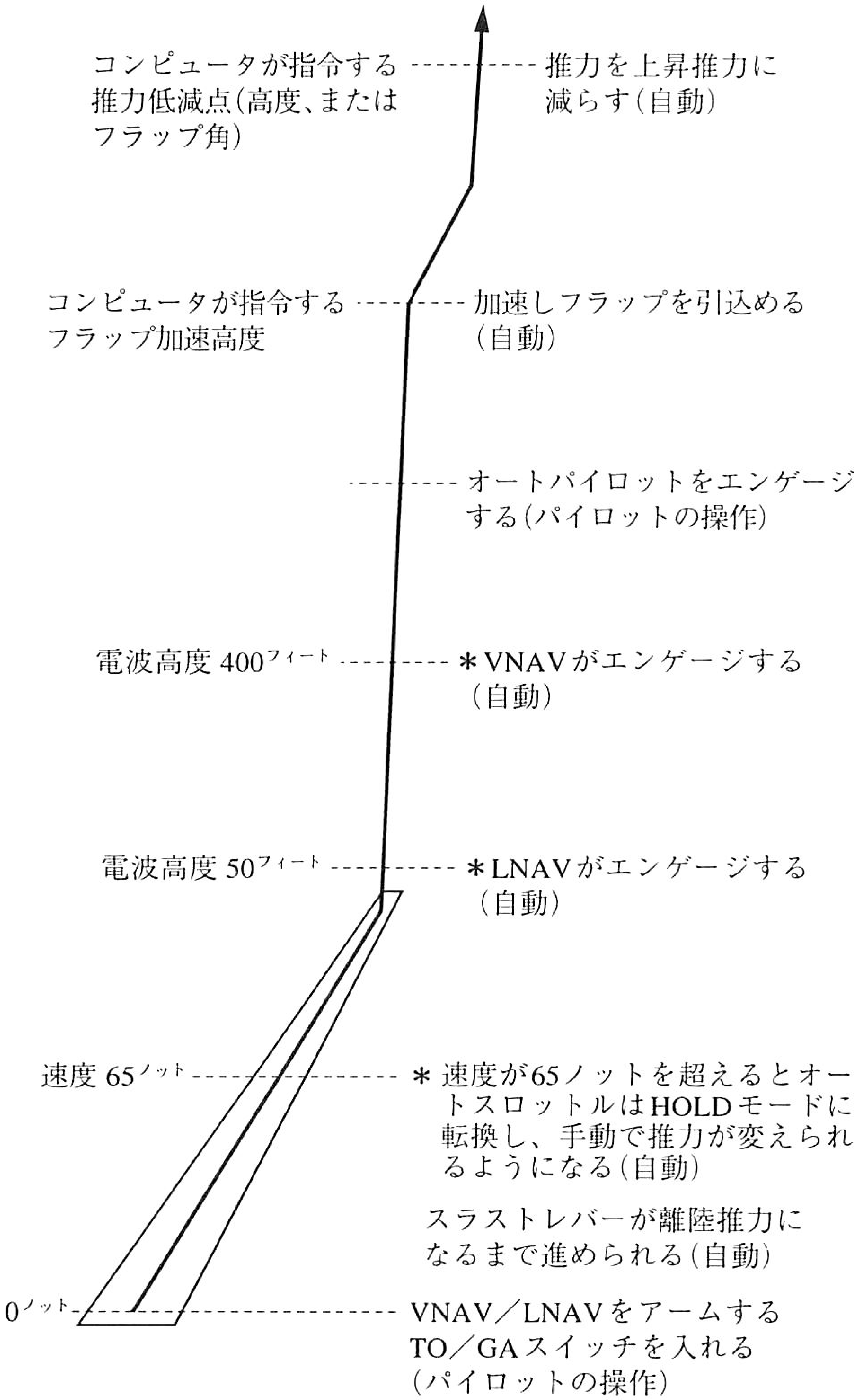


図 2-7　離陸時のモード転移（＊印で自動的に起きる）

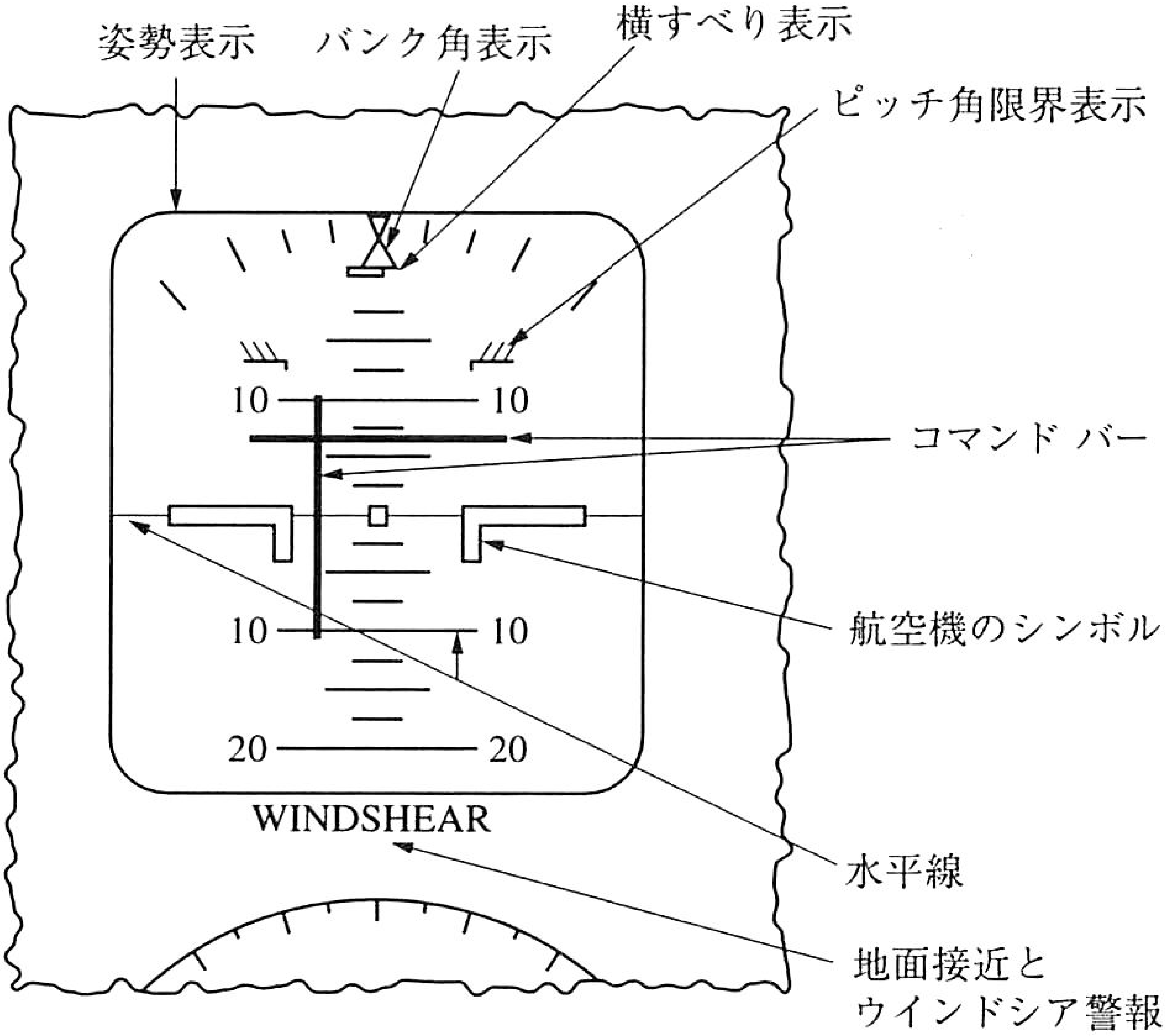


図 2-8　姿勢指示インジケータ

が離陸した。離陸重量が軽くエンジン全開であったから、初期の上昇率はかなり高かった。高度が六六〇メートルになったとき自動操縦が作動を開始し、高度獲得モードになった。このモードでは、自動操縦システムは初期上昇率を維持しようとする。一方、自動推力調整装置は通常のスケジュールどおり、高度が約四五〇メートル以上になると離陸推力より低い最大連続推力（あるいは上昇推力）にエンジン出力を減らした。推力が減ったときもとの上昇率を維持するためには、前に図1—23で説明したように、速度を落とさなければならない。そのため自動操縦

システムは機首を上げたから、速度はみるみるうちに安全離陸速度V_2に向かって減り始めた。V_2は失速速度の一・二倍であるから、この速度になってもすぐに失速し急降下するわけではないが、機体の運動は不安定になる。

このとき姿勢指示インジケータ（ＡＤＩ）のコマンドバー（図２―８）が上に振り切れて、パイロットには見えなくなった。本来ならバーが上にいったのだから、機首をさらに上げなければならない。ところが、実はこの場合は逆である。Ｂ７５７／７６７では速度がV_2の近くまで減った状態を「エネルギ・モード・フェール」といい、この状態ではフライトディレクタが間違った指示を出すので、パイロットがそれに従わないようにコマンドバーを隠してしまうのである。これではパイロットは迷ってしまう。しかし、このときのパイロットは状況を正しく判断し、急いでスティックを前に押して機首を下げて機の速度を回復し、あやうく失速を免れた。

この異常運航の後、ボーイング社は「パイロットは航空機のパフォーマンス（動き）をモニターすることを期待されている」とし、このようなとき運航の安全を確保するためには、フライトディレクタのコマンドを一時無視するよう、警告を出した。

このように、高度獲得モードでは失速プロテクションも働かず警告も出ないのでパイロットが機の運動をよくモニターし、事態を正しく判断して対処しないと危険なことになる。パイロットにはこのような全く新しいタイプのベーシックスキル（基本的技量）が要求されている。

しかし、机上で設計されたモードがそのまま受け入れられ、パイロットの注意義務だけが強調されてよいものであろうか。モードとはソフトウエア設計者たちが、航空機とそれを取り巻く環境との相互作用に関する情報のなかから何らかの規則性を見いだし、それらをいくつかのスキーマ（模式）へと圧縮することによって構築した仮想現実の世界である。それに基づいて現実の世界で航空機を飛ばそうとすることは、かなり大胆な試みである。現に、コックピットのなかに作り出されたこの仮想現実の世界に引き入れられたパイロットは、真実の世界の出来事を認識できなくなっている。いわゆる「状況認識」の喪失である。

これまで見てきたように、現在のモードが運航現場でかなり多くの問題を起こしている状況を踏まえて、運航現場での経験に照らしモードの淘汰が行われるべきではなかろうか。淘汰されるべきモードは、現実にいくらでもあるように思われるが、そのような動きはまだ顕著ではない。それは、操縦ソフトがブラックボックス化していて、ユーザであるパイロットや運航技術者と設計者のコミュニケーションの道が閉ざされているからである。

設計者は操縦ソフトについてのユーザ側から発せられた疑問に答えるべきなのに、それをしない。事故が起こった後、小出しにソフトの実態が明るみにでる程度である。もっと情報を公開してメーカとユーザの間での議論を盛んにし、合意の形成を図らなければならない。企業秘密の保護とかブラックボックスとかの陰に隠れて不合理が温存されることは、安全にとって最も重大な

脅威である。

ブラックボックスの闇のなかで、一方の意志だけが押し付けられる状況は、早急に改善されなければならない。

ストラスブールで

前に述べたエレバス山でのＤＣ10の事故も、航法コンピュータのデータベースに入力されたプログラムをパイロットが認識しなかったために起こったが、機上での入力ミスによっても、同じことが起こる。一九九二年一月二〇日、フランスのドイツ国境に近いストラスブール空港に進入中のＡ３２０が、エンジンも機体も何の異常がなかったにもかかわらず、空港の手前一五キロメートルの山腹に衝突した。乗っていた九六人中、八七人が死亡した。推定原因は、パイロットがモード切り替え用の押しボタンの操作を誤ったためとされている。

エアバス社は、この事故でパイロットは考えられないような多くのエラーをしたと指摘している。それは、

（1）フライトモード・コントロール用のパネル（図1―19と図2―9のＦＣＵ）の上の切り替え押しボタン［HDG V/S / TRK FPA］の下側のＴＲＫ　ＦＰＡ（トラック・飛行経路角）モードを選

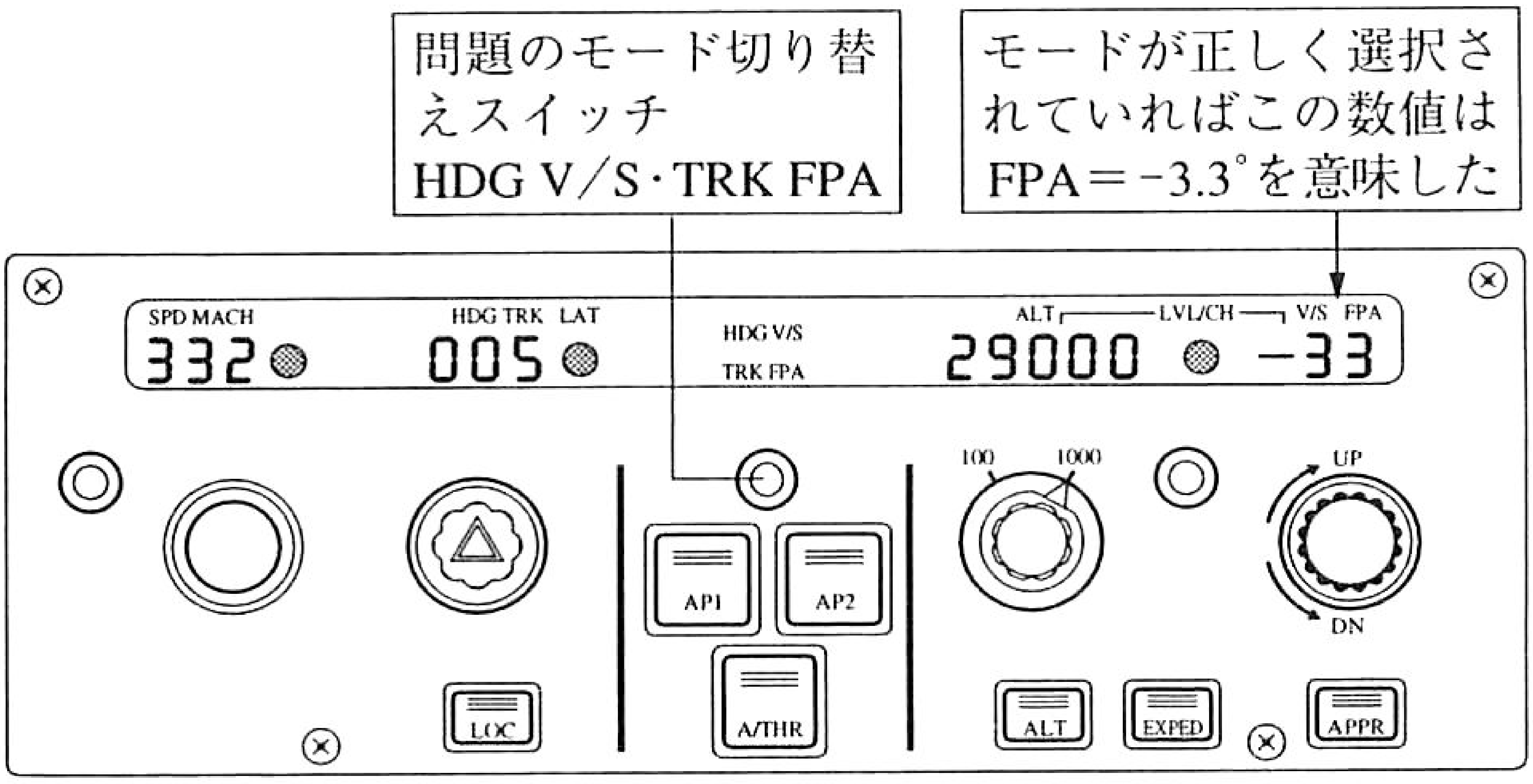


図 2-9　フライトモード・コントロールパネル（A 320 のFCU）

択すべきところを、間違えて上側のHDG V／S（機首方位・垂直速度）モードを選択してしまった。その上で、数値選択ダイアルで「三三」と設定した。

このことは「飛行経路角マイナス三・三度」で降下すべきところを、「降下率三三〇〇フィート／分（九九三メートル／分）」で降下するよう命令したことになる。この降下率は通常の五倍近い異常な急降下であった。

（2）選ばれたモードを示す文字がこのパネルのウインドウに表示されるが、その誤りに気づかなかった。

（3）姿勢指示インジケータ（図2―8）の画面に現れる航空機のシンボルも、選ばれたモードによって異なる。TRK FPAモードでは飛行機のシンボルが出るのに対し、HDG

V／Sモードではクロス・バーが出る。パイロットはその違いに気付かなかった。

（4）地面が近づいたとき高い降下率が出ると、プライマリ・フライト・ディスプレイの画面上の垂直速度の表示は緑色からコハク色に変わる。これにも気付かなかった。

（5）機首を下げ過ぎた飛行状態でも、異常を感じ取らなかった。

（6）電波高度計から地面の接近を知ることができたのに、それをしなかった。

などである。

つまり、パイロットは一度ボタンを押したあとはモニターを怠り、機械に任せきりにしたということである。

ここで当然起こる疑問は、なぜHDG　V／SとTRK　FPAのスイッチを別にしておかなかったかということである。A320の一つ前の世代のA310にはFPAというモードがないから、ここで起きたような切り替えミスは起こらない。同じスイッチの兼用は、ボーイングの新しい機種でもやっている。新世代機ではコンピュータの能力が飛躍的に増し、いくつかのモードが追加されたが、スイッチの数は増やさずに併用で済ませている。このことが、この事故の一因になった。

しかし、A320の生みの親であるエアバス社のジーグラー副社長（当時）は、この切り替えボタンは事故要因の一つに過ぎず、主な原因はパイロットが横のナビゲーション（飛行方向や飛

行ルートを決める）に注意を集中し過ぎたためである、といっている。つまり、パネルの設計（押しボタンの間違えやすい配置）ではなく、パイロットのミスを問題にした。

しかし、その後フランスのボソン運輸大臣が、モードの設計を変え混乱を避けるべきであるとの考えを示したため、エアバス社は表示の設計を変更し、ＨＤＧ　Ｖ／Ｓは新しく四文字にする一方、ＴＲＫ　ＦＰＡはもとの二文字のまま残して、間違いに気付きやすくした。

アプセムとストラスブールでＡ３２０型機が相次いで事故を起こしたことは、フランスでは航空機関士組合が以前から主張していた二人乗務の安全性の議論を再燃させた。これに対しジーグラー前副社長は、航空機関士組合に書簡を送って次のように述べた。

「ヨーロッパ航空産業の歴史において、Ａ３２０がブレーゲＸ４以来、最大の成功であることに疑問の余地はありません。骨肉相食む熾烈な競争の結果、優位を占めていたアメリカの地位を、初めて揺るがしたのですから。……これらの事故は私の心を引き裂きましたが、私に後悔の念はありません。私は今後ともこの道を進み続けるつもりです。それは、平均的な能力の乗務員のために、操縦しやすい飛行機をつくることです。人間に特別な能力が要求されるのは、特別な場合だけです」

この言葉のなかに出てくるブレーゲＸ４とは、第一次世界大戦末期に活躍した爆撃機で、戦後、輸送機として大量に製造されたものである。ずいぶん昔のことを引き合いに出したものであ

る。

このジーグラー前副社長の言葉は、自動化を推し進めることによって「平均的な能力の乗務員」でも航空機を安全に操縦できるようになるという信念を述べたもので、コックピットに一種のアマチュアリズム（素人技）の導入を図ったといえる。それも一つの見識であり、その試みが好結果をもたらしたなら、それもよかろう。しかし、ストラスブールの後、ツールーズ、バンガロール、ワルシャワなどで、エアバスのハイテク機は次々と事故を起こした。これらの事故はパイロットの過信以上に、設計者の過信が航空安全にとって障害になることを警告した。

では、インドのバンガロールではどのようにして事故が起ったのであろうか。

バンガロールで

一九九二年二月に、インド航空のA320型機がバンガロール空港に着陸しようとして降下を始めたときのことである。操縦していたのは若いパイロットで、その右の操縦席にはこのパイロットの機長昇格のための技量チェックをする査察機長が座っていた。このA320型機は海面高度四六〇〇フィートへの降下を管制から許可され、その高度をコンピュータにセットし、自動スロットルはIDLE-OPEN　DESCENTモードで降下していた。このモードではエンジンの推力は自動的にアイドル（ゼロ推力）まで絞られ、速度はオープン（そのときの推力と抗力

によって決まる）になる。
海面高度五〇〇フィート（設定高度の約四〇〇フィート上方）を通過したとき、モードは自動的にＡＬＴスター（設定された高度を捕捉し、それを維持するモード）に変わった。このときパイロットは査察機長にゴーアラウンド高度六〇〇〇フィートをコンピュータに入力するように要求した。これは着陸前にとるべき手続きで、なんらかの事情で着陸をやり直すゴーアラウンド（復行）のために、あらかじめコンピュータにどの高度まで上昇するかを打ち込んでおくのである。しかし査察機長はなぜかこの要求を無視し、コンピュータにはその進入ルートで許されている最低降下高度三三〇〇フィートを入力し、左席のパイロットに降下を継続するためＶＳ（一定の降下率で降下する）モードを使うように指示した。しかし若いパイロットはこの指示に従わず、自動操縦を切りフライトディレクタも見ずに目視手動操縦を続けた。
海面高度四二〇〇フィートでパイロットは再び「ゴーアラウンド高度六〇〇〇フィート」と要請したが、査察機長は今度もそれを無視した。
海面高度三五〇〇フィート（対地高度六〇〇フィート）に達したとき、さきに査察機長が設定した高度三三〇〇フィートを捕捉しようとするモード・トランジションが起こって、モードはＡＬＴスターに転移した。このときになって、査察機長はどうしたことかゴーアラウンド高度六〇〇〇フィートを設定した。ＡＬＴスター・モードにあるとき新しい高度が設定されると、モード

はCLIMB-OPEN　CLIMBモードに切り替わり、自動操縦システムはその高度を目指して上昇するようエンジン推力をコントロールする。エアバスインダストリによれば、この機能はA320を開発するとき、コックピット内が何かと忙しい進入段階で管制塔から急に高度変更の要求があった場合に対応できるようにという、あるエアラインの希望に沿ってそうしたものである。

このモード・トランジションが起きたため、オートスラストは一時エンジン推力を増加させた。査察機長はさすがにそれに気付いたが、しかし、その後の処置がまずかった。彼は上昇を止め降下しようとして、低い高度をコンピュータにセットしたが、その高度は空港の高度（海面高度二九〇〇フィート）よりも低かったのである。この高度設定の変更があったため、モードはまたIDLE-OPEN　DESCENTに転換し、機は降下を始めた。このモードでは減速することがあるので、対地高度一〇〇〇フィート以下では使用を禁止されていた。しかし、二人の協調がまずく、結果的にこのルールを破ってしまったのだ。

パイロットはこのモードになったことには気付いたが、モードを変えようとはしなかった。この場合も速度はだんだん落ち、飛行高度も正規の進入経路から百数十フィート下に落ちた。

電波高度三〇〇フィートになったとき、査察機長にIDLE-OPEN　DESCENTモードで飛んでいることを注意されたパイロットは、VSモードに変えようとして、自分の側の（左

席の）プライマリ・フライトディレクタ（PFD）（図1―19参照）のスイッチを切った。しかし、このモード切り替えは左右両側のPFDスイッチを切ってからでなければ、できないロジックになっていた。そこで査察機長は「こちらのは切っていないぞ」と注意はしたが、なぜか自分では切らなかった。査察機長がこのときなにを考えたのか、今でも謎になっている。結局、パイロットはVSモードに変更することができずに、もとのままのモードで降下を続けた。査察機長は「君はまだ自動操縦をやっているのか」と聞き、パイロットは「いいえ、切りました」と答えた。この査察機長の言葉は、モードがどんな状態にあるかを知りたかったためだとか、パイロットにコンピュータをチェックさせ、モードがまだ切り替えられていないことを分からせるためだとか、いろいろ言われているが、はっきりした説明はない。

対地高度が約一二〇フィートになったとき、速度は正常な進入速度を二三ノット下回る一〇九ノットに落ちたため、失速防止の自動プロテクションであるアルファ・フロア（第一章「堅固なプロテクション」の項　80ページ参照）が作動し始めたが、エンジンはまだアイドルのままで、機は七〇〇フィート／分を上回る降下率で高度を下げた。パイロットは「ヘーイ、落ちて行く」と叫んでスティックをいっぱいに引いたが、降下率は一三〇〇フィート／分に達した。

高度九二フィートで地面接近警報装置が「シンクレート」の警報音を出した。アルファ・フロア機能は正常に働きエンジンは加速を始めていたが、結局上昇するには間に合わず、A320は

飛行場の七〇〇メートル手前のゴルフ場内に墜落した。乗っていた一四六名中、九二名が死亡した。

この事故は二人のパイロット自らの不手際が招いたとはいえ、モードの複雑な移り変わりによって混乱し、適切な速度と高度の維持に失敗した。また、モードを切り替えるために左右両側のPFDスイッチを二つとも切らねばならぬということは、設計者にしてみれば設計ロジックのうえから必要と考えたものかも知れないが、パイロットにはわかりにくい。アプセムで事故を起こしたA320のアスリーヌ機長も、一つのスイッチを切るだけで済むように設計すべきだ、と批判している。

この事故が契機となって、エアバス社はIDLE-OPEN DESCENTモードで降下していて、速度がV_{LS}（選択することが許される最小速度で、普通、失速速度の一・三倍）をきると、モードがSPEED-VERTICAL SPEEDに切り変わって、その安全速度を維持し、また、そのモードが切り替わった時点での垂直速度で降下を続けるように、オートスロットルシステムが推力をコントロールする機能を、自動操縦システムに組み込んだ。これが「モード・リバージョン（逆戻り）」と呼ばれる機能である。この機能はバンガロールで起こった事故のように、パイロットの不適切な入力によって機が危険な運動に入るのを防止するのを目的とする。

今ではエアバスには、これ以外に一〇以上のモード・リバージョンが組み込まれている。例え

ば、過大な上昇率で上昇していて推力が足りないと減速するが（図1―23参照）、速度が最小選択可能速度V_{SL}プラス五ノットまで減ると、モードが飛行高度を変更するレベルチェンジ（LVL／CHG）モードに切り替わって、この安全速度を維持しながら上昇する。

しかしモード・リバージョンは安全性を高めるために考えられたものではあるが、パイロットがそれと気付かぬうちにモードの切り替わりがひんぱんに起こるようになると、それは新しいモード混乱の原因になる。

バンガロールでは、A320のパイロットが速度のコントロールを自動操縦システムに任せ切りにしたことが墜落の原因になったが、このことについてアスリーヌ機長の同僚であるフランス航空の飛行教官ジャン・ルイ・フェラン機長は、パイロット協会の機関紙で「なによりも自分を疑ってかかれということである。プロテクション装置は航空機の運用限界を広げるための手段ではないことを肝に銘じてほしい」と警告した。しかし、パイロットに気付かれないままモードが変わっていくような設計をそのままにして、パイロットに注意を促すだけでは効果がない。このことは、その後も多くの事故がモード混乱によって引き起こされた事実が証明している。

設計者が思いついた個々の制御ロジックは、旅客機が日常遭遇する路線運航において、いわば生態学的な環境の中で、きびしく淘汰されなければならない。

隣はなにをする人ぞ

設計者が考えたロジックがうまくいっていない例を、もう一つ挙げよう。

フライ・バイ・ワイアの利点は従来の操縦システムを相互に連結していた機構を廃止して、電気的な信号で結ぶことによって重量を軽減することである。例えば、A320では左右二本あるサイドスティックの間の機械的な連結は省略された。そのため二人のパイロットは独立に同時に操作できるが、その二つの操作は電気信号で結合されているだけであるから、二人が別な操作をしてもお互いに気が付かない。二人の操作が逆の場合はどちらかを優先しなければならないので、エアバスの設計者はこのコントロールの優先権ロジックを開発した。どちらのパイロットでもテークオーバ押しボタン（操縦の優先権を取るためのスイッチ）を押すと、他方のパイロットのスティックは無効になる。二人がボタンを押したら、後からボタンを押した方が優先権を得る（図2―10）。

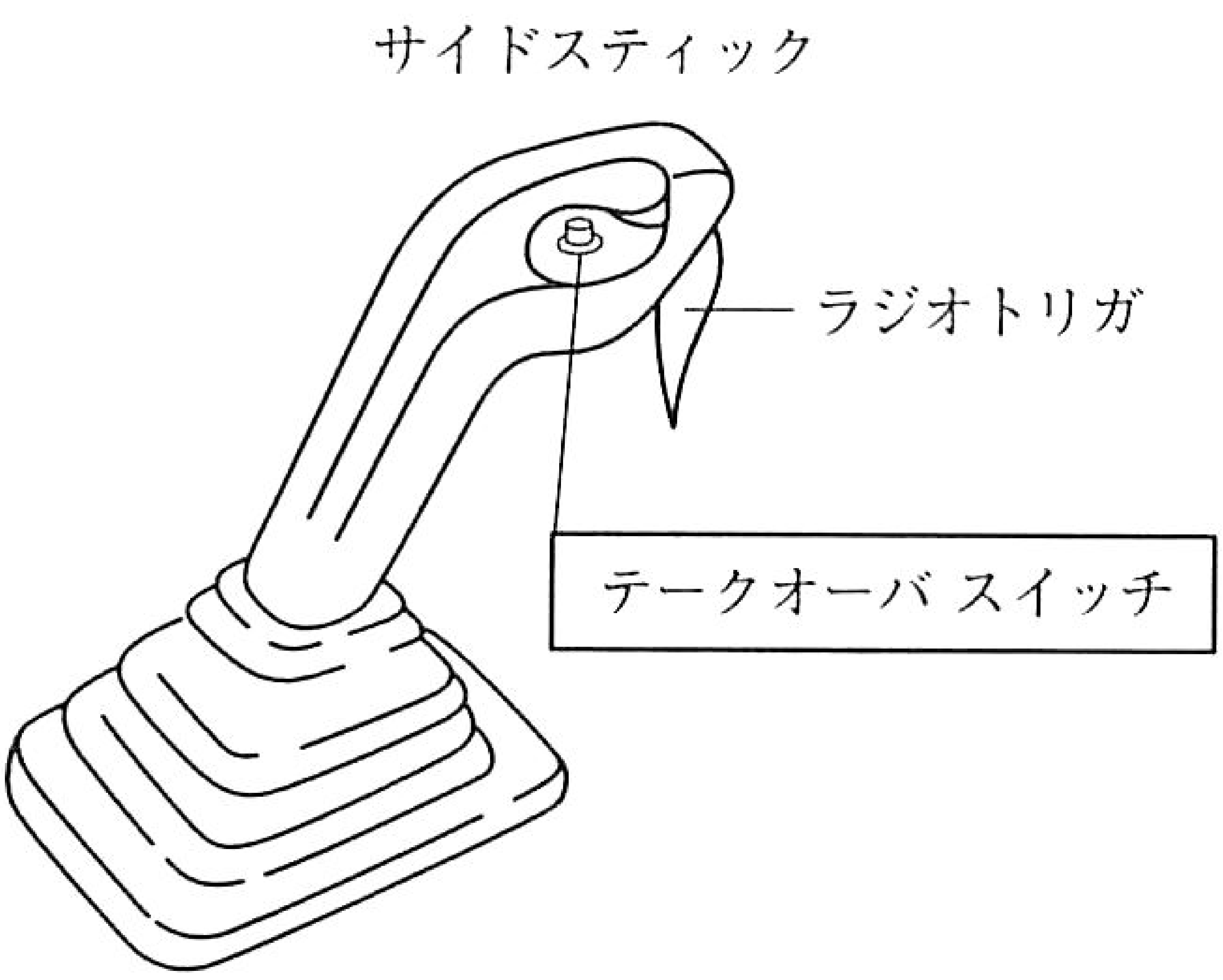


**図 2-10　テークオーバスイッチ
（優先権押しボタン）**

サイドスティックに多数の操作ボタンを取り付けると操縦に混乱が起こることは、最初、軍用機に採用された段階から問題になった。とくにスティックが大きく動くと、指の位置が変わり押し間違いが起こる。そのため、サイドスティックの動きはわずかだけに制限され、その変位ではなく、加えられた力をセンサーで検出する。A320でも同じである。

A320でこの優先権ロジックが使われなかったため、あわや衝突という異常事態が起こった。

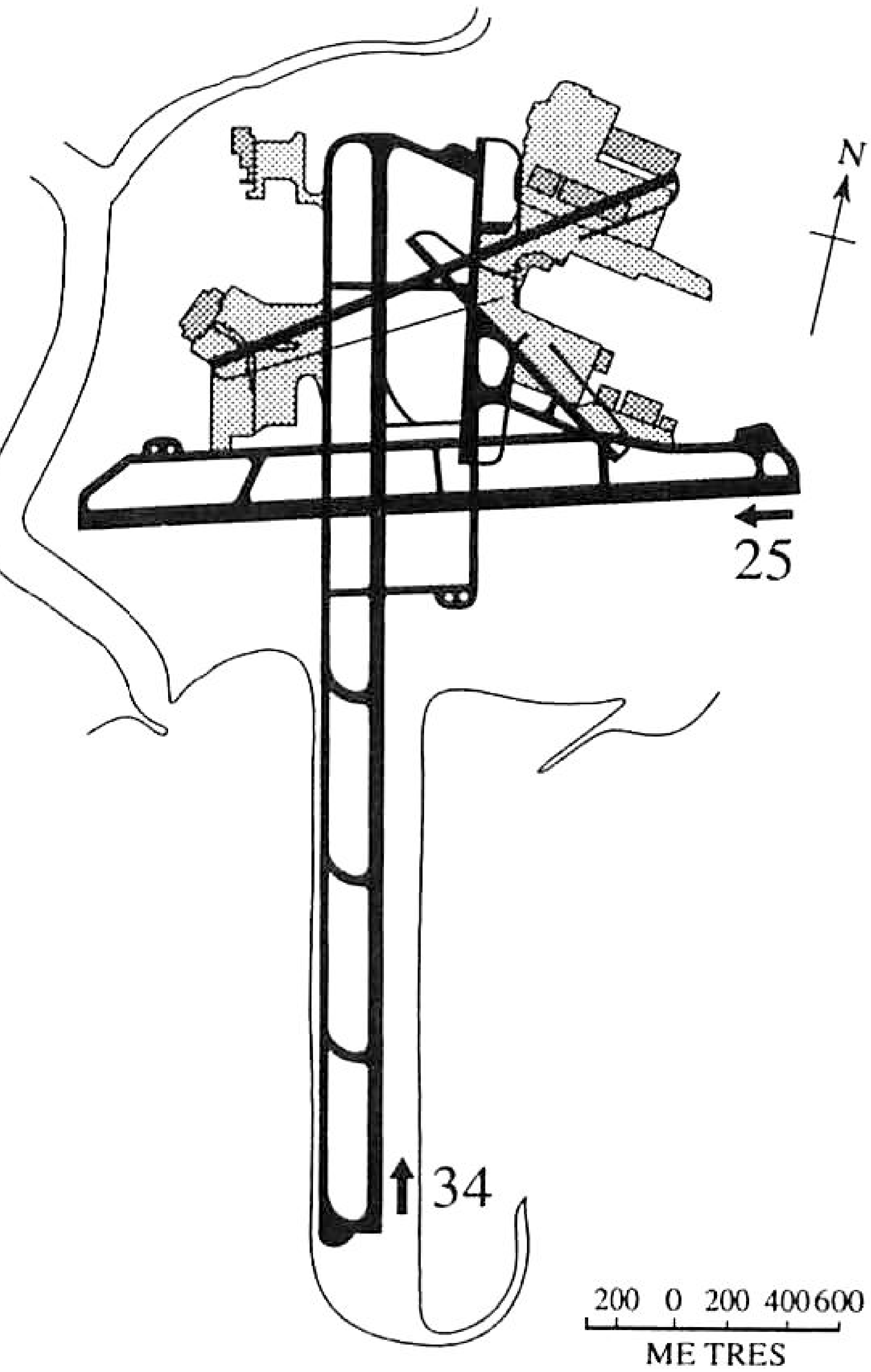


図2-11 シドニー空港の十字滑走路

シドニーにあるキングスフォード・スミス空港は交通混雑のときは滑走路25と滑走路34の二本を同時に使用して航空機を発着させていた。滑走路は、その走行方向を表す二桁の数字を付けて区別する。25という数字はその滑走路の向きが磁北から時計まわりに二五〇度であることを示し

ている。したがって、滑走路34は滑走路25と九〇度の角度で交差、つまり直交している（図2—11）。

一九九一年八月一二日、タイ航空のDC10型機が滑走路25に東から着陸して国際線ターミナルに向かって地上を走行していた。そのときアンセット・オーストラリア航空のA320型機が南から滑走路34に着陸を許可され進入中であった。このA320の機長は交差する滑走路25の上を走行中のDC10を見て着陸の中止を決心し、エンジンのパワーを上げ、サイドスティックを引いて機首を上げようとした。副操縦士には自分がコントロールをとると伝えた。ところが、副操縦士は、なぜかスティックを機首下げ方向に押していた。

A320では両側のサイドスティックからの入力の和をコンピュータに入力するようになっている。だから、このときは二つの入力は相殺され、機首はほとんど上がらなかった。しかし幸なことに、エンジンの推力が十分あったため、辛うじて上昇した。

DC10のパイロットもミスをした。交差点の手前で停止して待つ決まりになっているのに、そのまま前進した。だがA320が進入して来るのに気づき、あわてて急ブレーキをかけ、車輪から煙を出して止まった。機首は交差部から少し突き出した。A320はDC10のわずか一〇メートル上をすれすれに飛び越した。翼幅が五〇メートルもあるDC10にとって、この一〇メートルという間隔は、まさに衝突寸前であった。

この種の異常運航は「滑走路侵入」と呼ばれる。これはいくつかの不祥事が重なって起こった。左右のスティックが無関係に操作できること、優先権ロジックが有効に使われなかったこと、交差する滑走路の同時使用についての安全対策の不備などである。

この異常運航の後、エアバスインダストリは副操縦士が不用意にスティックを操作したこと、優先権ロジックが無視されたことに注目して、パイロットがマニュアルに忠実に従うよう、厳しい規律遵守をエアラインに要求した。エジプト航空のベラ支配人も「A320はそんなに難しい飛行機ではない。しかしパイロットは従来の飛行経験から抜け出さねばならない。乗員の内部規律は必須である」といってこれに同調した。エアラインの責任者としてはそれは当然であろう。

しかし、二本のスティックを機械的に連結しておけば、二人のパイロットはスティックの反力からお互いの操作を認識することができるから、さきに述べたような不測の事態は起こらない。

設計が悪いのかパイロットが悪いのかは、容易に決着のつかない議論であるが、東芝で長年プログラムの開発を指揮された木下旬氏の著書『ソフトウエアの法則』（中央公論社刊）は示唆に富む。その三一条には「人間の信頼性に重きを置くプログラムを、人は信用してはならない」とある。人間がいつもロジックに忠実に従って行動することを前提にした設計は、危ういということである。

機械には信頼性と柔軟性が不足しているために、それに大きなオーソリティ（権限）をもたせ

ることができない現状では、人間の介入がどうしても必要になる。そのとき、人間の誤りを犯しやすい性質を認め、コンピュータ・ロジックがエラーを許容するように作られていなければならない。人間の信頼性に多くを依存した設計は、現実世界では脆弱（ぜいじゃく）なものとならざるをえないのである。

　それでもなお、人間を「安全の最後のよりどころ」とせざるをえないのが、現状の技術である。例えば、エアラインが運用する航空機では、自動操縦システムが暴走したりコンピュータが故障したりしたときなどは、パイロットが手動で操縦できなければならない。このための予備の操縦系統が、コンピュータを介さない機械式バックアップ系である。エアライン・パイロット団体の国際連合体（ＩＦＡＬＰＡ）が「フライ・バイ・ワイア式飛行制御システムは、一次操縦系とは独立したバックアップ系を装備すべきである」と声明しているのは、いかにすぐれた自動操縦システムを装備していても、それに最後まで任せることを容認しないという、パイロットの意志を表明したものである。このように、世界の航空界は、今後いかに技術が進もうとも、自動操縦システムに常に一〇〇パーセントのオーソリティを与えることはないであろう。このことは、航空輸送が「人による、人を運ぶ」行為である限り変わることはない。

　このようなわけで、現在、自動操縦システムを装備したすべての機種で、パイロットは自動操縦を解除して一〇〇パーセントの操縦のオーソリティを手にすることができる。そのためには、

パネルの押しボタンを使うが、それ以外にも、操縦ホイールに付いている「直感的（あるいは本能的）スイッチ」と呼ばれる自動操縦解除スイッチを押せば、自動操縦を解除することができる。

また、自動操縦を切らなくても、パイロットは自分の力を自動操縦に重ね合わせて舵面を操作することができる。前述したように、これをオーバーライドという。オーバーライドのオーソリティは低く抑えられているから、パイロットがかなりの力で操舵しても機体の反応は鈍い。しかし、操縦ホイールやスティックにある程度以上の力を加えれば自動操縦は解除され、パイロットは一〇〇パーセントのオーソリティを手にすることができる。とっさの場合は、これが自動操縦を解除する最も有効な方法である。

ところが、自動化への過渡期に作られたA310とA300−600型ではスティックに力を加えても、ある高度以下では自動操縦は切れない設計になっている。どうしても直感的スイッチを操作しなければならない。しかし緊急の場合、パイロットはこの操作を忘れ、力ずくで自動操縦にオーバーライドすることになり、その結果、異常な機体運動が起こる。実際にこれが原因になった墜落事故や異常運航が何度か起きた。これについての例をいくつか見てみよう。

オーバーライドの悲劇

変動する風のなかを着陸進入するときなど、自動操縦だけで機体姿勢を維持することがむずかしいと、パイロットがスティックやホイールを操作してその信号を自動操縦コンピュータの指令信号に重ね合わせる操縦操作（オーバーライド）を行う。このオーバーライドによるA300－600とA310の異常運航が過去に何度か起こっている。まず、一九八五年（場所とエアラインは公表されていない）に、次に一九八九年一月一九日にはヘルシンキ空港で起こった。

三番目の異常運航は一九九一年二月一一日、ドイツのインター・フルーク航空のエアバスA310が、モスクワ空港に着陸しようとしたときに起こった。滑走路が塞がっていたため、管制塔は着陸を中止してゴーアラウンドし高度六八〇メートルで待機するように指示した。A310はゴーアラウンドして高度三八〇メートルから上昇を始めたが、機首が上がり過ぎたので、パイロットはスティックを押してエレベータを機首下げに操舵した。エレベータはプラス一四度になった。逆に、自動操縦はゴーアラウンドを続けようとスタビライザを機首上げ側マイナス一二度にトリムした。尾翼全体としては「への字」に折れ曲がった形になり、機体はトリムからずれた不安定な状態になった。

それでもA310は上昇を続けたが、高度が四五〇メートルに達しとき、突然自動操縦が解除された。この高度（四五〇メートル）以上ではスティックに一五キログラム以上の力がかかると

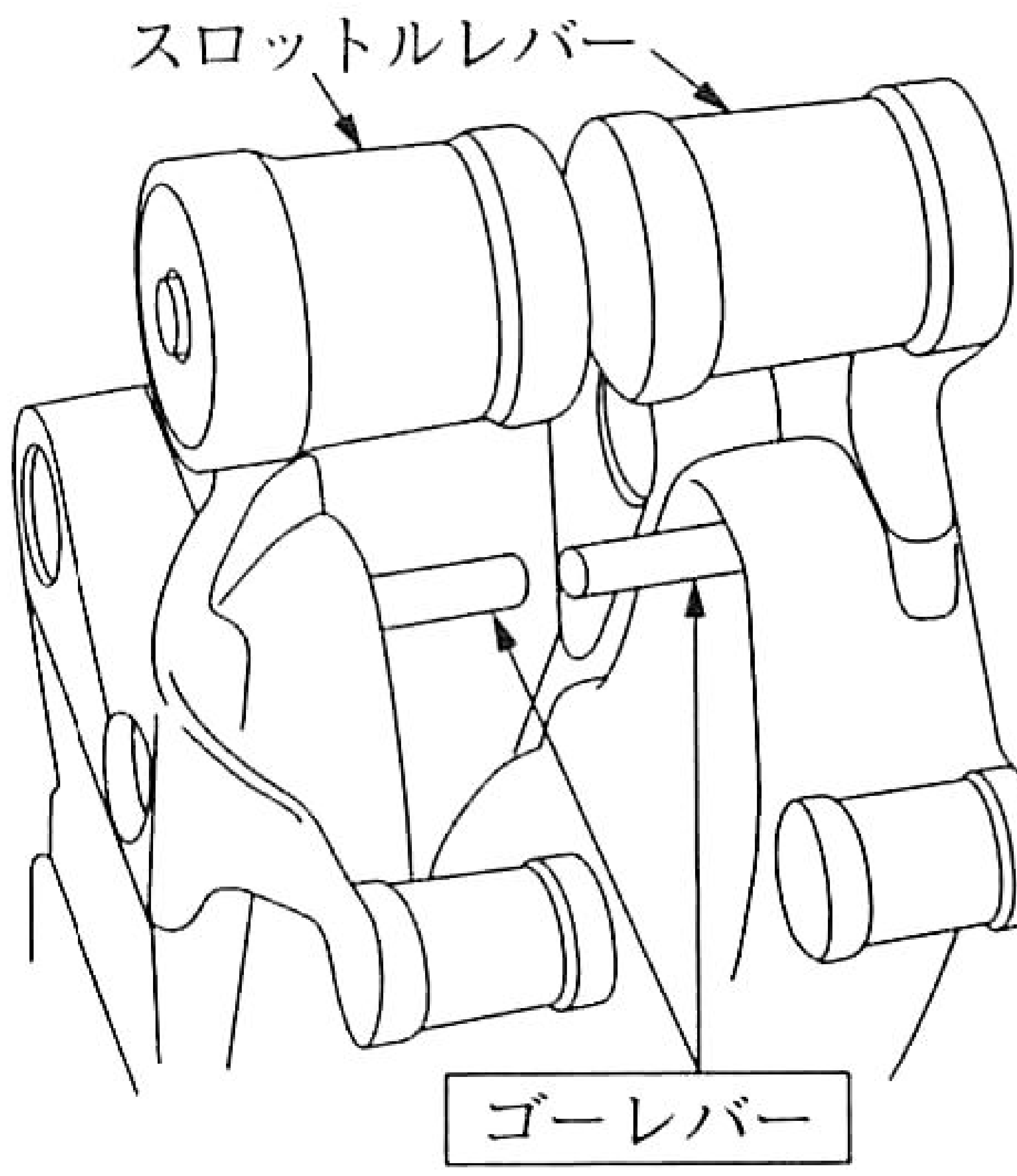


図 2-12　A 300-600 のゴーレバー

自動的に解除されるようになっている。このときパイロットはスティックを強く押していたのである。

自動操縦が解除されると、スティックは突然軽くなる。驚いたパイロットはスティックから手を放した。当然エレベータは中立位置にもどる。推力は増加しており、スタビライザトリムは機首上げ側に大きくずれていたため、Ａ３１０には急激なピッチ・アップが起こり、失速した。その後、高度四五〇メートルまで落ちたとき失速から回復し、再び上昇した。このような上下運動を六分間に五回繰り返したが、幸い、到達高度は次第に上がっていった。四回目の降下中、パイロットはエンジンを絞り、また、思わずエレクトリック・トリム（スタビライザを自動的に中立位置に戻す装置）のスイッチを押したらしく、スタビライザが機首下げにトリムされたため尾翼は正常な形に戻り、高度二六〇〇メートルで正常な飛行状態に戻ることができた。

前述した一九九四年九月にルーマニアでタロム航空が起こした異常運航も、結果的にはモードの変化に気づかなかったパイロットのオーバーライドが原因であった。これらの異常運航が起こるたびに、エアバス社はユーザに注意事項を通達した。ところが、「霜を踏んで厚き氷に至る」と

いう諺（ことわざ）どおり、小事故が続くとやがて大きな事故が起こる。それはわが国で、名古屋で起こったのだ。

一九九四年四月二七日の午後八時過ぎ、中華航空のエアバスA３００－６００型機は機長が「わあー、素晴らしい天気だ」と歓声をもらすほど穏やかな名古屋空港に着陸しようとしていた。機は手動操作で進入したが、操縦していた副操縦士が高度三三〇メートルでスラストレバーに付いているゴーレバー（図2－12）を不注意で引っかけたため、自動操縦がゴーアラウンド・モードになった。このモードは着陸を中止して上昇する自動操縦モードであるから、エンジン推力は増加した。A３００－６００型では推力が増すと機首が上がる。そのため飛行経路は降下から水平に移った。

機長は「君、そのゴーレバーを引っかけたぞ。……それを解除して」と注意したが、副操縦士はなぜか、そのレバーを戻さなかった。その二〇秒後に機長が「君は、君はゴーアラウンド・モードを使っているぞ」と注意したときも、副操縦士はゴーレバーはそのままにして自動操縦のモードを、おそらく着陸モード（LAND）に変えようとして押しボタンを操作したらしいが、結局、できなかった。どうも副操縦士は操作手順をよく理解していなかったらしい。

普通の操縦手順では、着陸をいったん諦めてゴーアラウンド・モードにしたら、あらかじめ設定された高度まで上昇する。この高度に達するとモードは自動的に高度維持モード（ALT H

ゴーアラウンド・モードのdisengageは他のモードをengageするだけでできる。
もし2つのAP(オートパイロット)がengageされていたら、AP2(右側)だけがdisengageされる。
(1)縦のモード(VS、ALT、LVL/CHG, ALT＊、あるいはPROFILモード)がengageされると
――ゴーアラウンド・モードはdisengageされる
――HDGモードが横モードにengageする
――オートスロットル・システムはengageされた縦モードに対応するモードにengageする
(2)横モード (HDG SEL, VOR CAPTUREあるいはTRACK phase, NAV CAPTUREあるいはTRACK phase)がengageされると
――ゴーアラウンド・モードはdisengageされる
縦モードのGOAROUND(SRS)は活きたままである。

[注]
VS ；垂直速度(上昇率)モード
ALT ；高度獲得モード
LVL/CHG ；レベル変更モード
ALT＊ ；高度捕捉モード
PROFIL ；プロフィル・モード
HDG SEL ；針路選択モード
VOR CAPTURE or TRACK phase；VOR捕捉あるいは追跡段階
NAV CAPTURE or TRACK phase；NAV捕捉あるいは追跡段階

表2-3 ゴーアラウンド・モードの解除

OLD）に切り替わり、機は水平飛行に移る。その後、パイロットは再び着陸モードに入れるのである。ゴーアラウンドで上昇中は直接、着陸モードに切り替えることはできない。このロジックのわかりにくさがトラブルの始まりであった。

一年半ほど前に副操縦士になったばかりの二六歳のパイロットが、このとき思い出さなければならなかった自動操縦モード切り替えの手順がどんなものなのかを、見てみよう。

マニュアルの謎解き

「マニュアルの文章は、すでにその使い方を知っている人にしか理解で

きないような言い回しで記述されている」というのが、前出の『ソフトウエアの法則』にある。A３００―６００のマニュアルにはゴーアラウンド・モードの解除のしかたが次のように書いてあるが、なかなか読みにくい。

二六歳のパイロットが訓練所で学んだはずのA３００―６００のマニュアルを、表２―３に引用した。わが国のエアラインでは、マニュアルの用語に英語がそのまま使われることが多い。適当な訳語がないこともあるが、コンピュータ画面の表示と同じ用語を使ったほうが実際に役立つからでもある。しかし、読者はパイロットの隠語の薮に連れ込まれて、途方に暮れることになる。無理に理解しようとする必要はない。なお、ここで使われている「engage」は「使用中」の意味で、「disengage」は「使っていない」の意味である。

フランス民間航空局は、オーバーライドの危険性についてはパイロットに十分な情報が与えられていることを強調して、「正しい操作をすれば事故は防げたはずだ」という立場をとっている。実際、エアバスインダストリは次に列挙する情報を各エアラインに通達している。

（１）一九八五年六月、同年三月に起こったA３００―６００の異常運航に関連して、オーバーライド時の注意事項を通達した

（２）一九八八年三月一八日、一二〇〇メートル以上の高度でサイドスティックに一五キログラム以上の力が加わるとオートパイロットが解除するよう改修策を設定し通達した

（3）一九八九年三月九日、フィンランドで発生したインシデントに関連した技術覚書を発行した

（4）一九九一年一月、オーバーライドについての「注意書き」を追加した

（5）同年三月、モスクワでの異常運航に関連したオペレータ情報を出した

（6）同年六月、オートパイロット・オーバーライドに関する注意喚起のための飛行乗員用オペレーション・マニュアル通報を発行した

（7）一九九三年六月二四日、右の（2）に述べたコンピュータ改修措置を勧告する技術情報を出す。実施はエアラインの自主性に任せた

（8）一九九四年、（7）の技術情報に書かれたコンピュータ改修は義務的になる

（9）一九九六年七月、高度一二〇メートル以下でも（7）の改修が義務づけられた。ただし、スティックに加わる力は、引き側一五キログラム、押し側四〇キログラムである

このように一〇年以上にわたって注意と勧告を出し続けたが、事故やインシデントは跡を絶たず、名古屋での事故が起こってから、ようやく（9）の改修を義務づけたのである。そこに至るまでエアバスインダストリはパイロットの手順違反が事故原因であるとの見解をとった。

このようなトラブルは米仏間にも起こっている。一九九四年一〇月にアメリカン・イーグル航空のATR72がデトロイトで着氷のため墜落した原因をめぐって、米国国家運輸安全委員会とフ

ランス当局とが対立した。この事故は翼の上面に氷が着いたため気流が乱れて、エルロンに普通作用するのとは逆向きの力が働く、いわゆる「エルロン逆効き」の現象が起こった。この異常な力が加わったのを知ったコンピュータが自動操縦を切った。しかしそのときパイロットも大きな力を操縦輪に加えていたためエルロンがその力で動き、航空機がロール転覆を起こし、パイロットも回復操作に失敗して墜落したものである。

米国側は「マニュアルにこのエルロン逆効きについての説明があり、その結果として予期せず自動操縦が切れることを特定して警告していれば、この事故は防げた」という見解を発表した。これに対しフランス民間航空省は「パイロットが着氷条件のことをすっかり忘れ、すでに受け取っていた多くの警告や指示や規則を無視したことが原因だ。だから自動操縦が切れたとき急なロールが起こったのに驚いたのだ」として、米国の調査報告は間違っていると批判した。

さて、名古屋での事故に戻ろう。

副操縦士は全力をふるってスティックを押して、エレベータを機首下げ側に操舵した。ところが、自動操縦を解除していなかったので、スタビライザは機首上げ側に動き、ここでも尾翼の「への字」形が発生した。しかし、スタビライザの効きはエレベータよりは二倍も強力だから、機首は下がるどころか上がり始めた。二人の操縦士は躍起になってエレベータを押したが、効果がなかった。それどころかピッチ姿勢はトリム状態から大きくくずれ、機体の動きは不安定になっ

た。
「やっぱり押し下げられません」と副操縦士。
その後、操縦を引き継いだ機長もスティックを押し下げようとしたが、機首は上がる一方であった。機長はもう一度「ゴーレバー」と叫び「ちきしょう、どうしてこうなるんだ」と怒鳴り、ようやく着陸のやり直し（ゴーアラウンド）を決意して、管制塔にその旨を告げた。
ところが、正規の手順では、ゴーアラウンドのときはフラップを一段だけ引き上げるところを、副操縦士はほとんど完全に引き上げてしまった。このフラップ角では揚力は不足する。機長は「ええっ、これじゃ失速するぞ」と叫んだ四秒後、失速警報が鳴り響いた。機は失速し、機長が死にものぐるいで姿勢を回復しようと努めたが、最高点五二〇メートルに達したあと墜落した。
乗客のうち二四九名が死亡、七名は重傷を負ったが生き残った。

オーソリティをめぐる争い

なぜ人と機械の争いを防ぐような設計ができなかったのか。当時のエアバスインダストリのジーグラー副社長が「エアバスのフィロソフィ（設計思想）は、パイロットが危険な領域に踏み込むことを防ぐガードレールを提供できる技術があるなら、われわれはそれを導入しなければならぬ」と語っているように、エアバスはできる限りのプロテクションを組み込んだ。しかし、中華

航空機事故はオーバーライドという危険領域に対するガードレールはなかったことを示している。

エアバスインダストリの訓練・運航支援担当副社長のピーエル・ボー機長は、「A320は飛行を最適化し安全性を増すためにある程度複雑にしたが、パイロットがオートパイロットやオートスラストが何をやっているかわからなかったり、起きていることが気に入らなかったなら、そのシステムを切るものと仮定していた。なぜパイロットがオートパイロットを切るよりも、それと戦うようになるのかは、想像し難い」と慨嘆した。

人間の弱点をコックピットから排除するために、複雑なプロテクション機能を組み込んではいても、異常事態に対処するためパイロットのオーバーライドの可能性を残さなければならないというジレンマがここに現れている。このジレンマから抜け出すためには、エアバス社はパイロット側の意識改革が必要であることを強調し、「オーバーライドの問題は設計だけの問題ではない。パイロットの教育訓練と規律維持によって解決しなければならない」と言っている。

人間と機械とのミスマッチを人間側の責任にする考え方は、デトロイト付近でのアメリカン・イーグルのATR72の墜落事故や、名古屋空港における中華航空のA300―600の事故原因に対するフランス当局の見解にも、はっきりと現れている。「ゴーアラウンドのような緊急処置をとるときは、パイロットが明確な意図のもとにオートパイロットを切ってから行うべきであ

る。それを切らずにオートパイロットに手を加える（オーバーライドする）ようなことがあってはならない」というのがエアバスの言い分である。しかし、日常、自動化の利点を言い聞かされ、常時できるだけ多くの自動操縦を使うことを奨励され、そのため基本的な操縦技量の維持に支障を来たしているパイロットが、緊急時に自動操縦を切る決断ができるだろうか。

逆に、自動操縦の使用は最小限にとどめて手動操縦の技量維持に努めさせ、その必要最小限の自動操縦はどんなときでも間違いなく使えるように徹底して訓練するというやり方もあるのではないか。そうすれば、風も穏やかで見通しもよく機体になんの異常もないときに、自動操縦を使ったがために墜落した、中華航空機のような事故の頻発は防げる。

オーバーライドについては、ボーイングとダグラスはエアバスとは別の考え方をもっている。ボーイングはスタビライザトリムはある値までは自動で動くが、それを超えてまでパイロットの意志に逆らって動くことはない。肝心のところではパイロットの意志を優先させているのである。ダグラスもパイロットにより多くの責任を負わせる。同社の主任テストパイロットのジョン・ミラー機長は、「外を見ている多くの経験を積んだパイロットが、われわれ（設計側）が設けたデテント（レバーがそれを超えて操作されないための歯止め）を超えようと望むなら、なにか理由があるに違いない。われわれはパイロットがそうすることを許す。その制限がどんなものかについてのフィードバックを彼に与えはするが」と言っている。

エアバス機はパイロットが急激な引き起こしをして揚力が過大になった結果、機体に二・五ｇ以上の荷重がかかるのを防ぐプロテクション機能を備えている。これは機体が二・五ｇの制限運動荷重に耐える強度を持つことが耐空性証明の要件になっていることを根拠にしている。しかし、この荷重は運航中繰り返しかかる荷重に対する制限であって、機体が破壊せずに耐えられる最大荷重（究極荷重）は、これに安全係数一・五をかけた三・七五ｇである。このことから、ダグラスのミラー機長は「われわれは二・五ｇより大きな荷重を利用できるようにしている。証明を受けた垂直荷重ｇの限界値にはかなりの余裕があるのが実状だから」と言っている。多少オーバーな荷重をかけてもそれほどの危険はないから、致命的な危機を避けるためなら、ある程度のリスクを冒す裁量権をパイロットに与えるほうが、安全性が高まると考えているのである。

このように、ボーイングとダグラスは、ぎりぎりのところではパイロットの意志を優先させている。

このアメリカ流の考えは官と民とを問わない。米国連邦航空局（ＦＡＡ）のブロデリック前副長官は、パイロットがミスをしてそれに気づかないとき、自動操縦モードがデフォルト・モードに転移することを批判して、「これは直感的でなく、容認できない」と語っている。「デフォルト」というのは、いつもは陰に控えていて、何か異常が起こると命令しないのに出て来て、現行のモードにとって代わる「暗黙モード」のことである。前副長官が例に挙げたのは、この章の前

半に述べた、過大な速度でフラップを展開したため、突然、自動化システムがゴーアラウンドを始めたタロム航空のA310型機のオルリー空港での異常運航、その他いくつかの自動的ゴーアラウンドである。

エアバスも中華航空機事故の後、ようやく前述の（9）項の改修が義務づけられ、パイロットがスティックを強く引くと、自動操縦が解除されるようになった。

しかし、異常が起こったらすべてをパイロットに任せるだけでよいのか、それは無責任ではないか、という疑問が残る。実際に、自動操縦が突然切れたとき、パイロットはうまく操縦を引き継ぐことができるのか。それが問題なことは、メーカ自身も認識している。その例はダグラス社が一九九三年九月にMD11を運用しているエアラインに出した警告である。

MD11の自動操縦システムは、失速警報が出ると迎角を減らすためエレベータを五度機首下げ側に操舵する。パイロットがこの自動操縦システムの働きに逆らって機首上げ操舵をしようとすると、約二五キログラムの力が要るから、舵が重くなってパイロットに対しオーバーライドをしていることを警告する。それでもパイロットが大きな力を加えると、自動操縦は切れて、パイロットに操縦の権限が移る。これはこの航空機メーカの設計思想に従っている。

問題は、そのあとである。パイロットが大きな力をかけているときに自動操縦が解除されるから、エレベータは操舵され、機体は突然機首を上げる。悪いことに、MD11は重心の位置が後ろ

にあるため、他の機種に比べて舵が軽い。つまり、小さい操舵力で大きな機首上げが起こる。
このMD11特有の性質のため、乱気流を飛んでいたニュージーランド航空のMD11の自動操縦が突然切れたあと、パイロットが過大な回復操作をして、危険状態に陥ったことがあった。ダグラス社からの警告は、このインシデントのあと出された。それには、乱気流中を飛んでいて姿勢が必要以上に変化したら自動操縦を切ってコントロールをスムーズに引き継ぎ、ピッチを安定させるが、手動操縦は最小限度とし、トリムをとってはいけない。安定性増大装置が姿勢維持できるような状態にもっていく。自動推力制御も切って、手動でスロットルを調節するが、速度を維持しようとせず、速度限界を越えないよう、必要最小限にとどめること、と教えている。
この警告の内容は妥当であるとしても、突然、何が起こったかわからず混乱しているパイロットに、完全を期待することは無理である。このPIOと言われる人間―機械系の不安定運動（最近はAPCと呼ぶ。後述）を防ぐためには、一つには機体固有の動安定性を改善すること、二つには、自動操縦システムとパイロットの両方からの指令入力が常に矛盾しないように保つことによって、コントロールの引き継ぎに不連続をなくすための「シンクロナイズ（同期化）」の機能を機械側に備える必要がある。そのような配慮が設計上なされていなければ、「パイロットの意志を尊重する」といっても、それは「絵に描いた餅」に過ぎない。一九九七年九月に日航機で同様の事故が起きたことは、そのことを教えている。

設計は運航経験に学べ

エアラインとメーカで運用方針が食い違ったままになっていることも、安全に対する妨げである。次に、その例を挙げよう。

一九九三年九月一四日、ルフトハンザ航空のA320が激しい雷雨中ワルシャワ空港に着陸しようとした。この日、ウインドシア（風の向きと速さが狭い範囲で急に変わる現象）の危険が予想されていたので、パイロットは後ろから風が来ても失速しないよう、進入速度に二〇ノットを加算していた。ところが、接地時、さらに二〇ノットの追風が吹き、結局、機は通常の接地速度一三四ノットではなく一七四ノットという速い速度で接地することになった。そのため滑走路端から滑走路全長の三分の一の七〇〇メートルを残すだけのところに接地した。その上ブレーキのかかりが遅かったから、機は滑走路の先端を乗り越え土堤に衝突した。左翼が破壊し、機体は火事になった。乗っていた七〇名中二人（うち一名は副操縦士）が死亡し、四〇人が負傷した。

この事故の際、パイロットはエアバス社が決めた手順どおり一〇〇パーセントフラップ（フラップ角四〇度）を使用していた。ところが、A320の設計では一〇〇パーセントフラップの時にはプロテクション機能が働いて、接地後、車輪が一三三キロメートル／時相当の回転を始めるまでは主翼のスポイラが展開しないようになっている。スポイラはスピード・ブレーキとして働く以外に、翼の揚力を減らし、機体重量を早く車輪にかける働きをするが、スラスト・リバーサ

（エンジンの推力を逆向きにして機を減速させる装置）は機体重量が両車輪にかかるまでは作動しないから、スポイラの展開が遅れるとスラスト・リバーサ作動のタイミングも遅れる。この作動条件のため、スポイラとスラスト・リバーサの両ブレーキ作用が約九秒遅れた。これと接地速度が速かったことが重なってオーバーラン事故になった。

ある関係者は、この程度の高い接地速度でも、パイロットがブレーキ操作にオーバーライドできたら、遅れは二〜三秒程度であるからオーバーランにはならなかったと推定している。パイロットが介入できる操作手順であったら、この事故は起こらなかったという意見である。

ルフトハンザ航空も同じような考えであった。すなわち、A320でも七五パーセントフラップならばスポイラを手動で展開できるから、緊急の場合これを使えば接地後早く車輪を地面に接触させることができ、オーバーランを防げるだろう。そこでルフトハンザは、滑走路が濡れていたり滑りやすかったりするときは七五パーセントフラップを使うように指示を出した。最後の歯止めとしてパイロットの役割に期待したのである。

ところが、エアバス社はこれに反対し、一〇〇パーセントフラップを使う従来の手順を変えようとはしない。その理由は、ルフトハンザがいうような七五パーセントフラップのときには、進入速度にはさらに五ノットを加えなければならず、その結果着陸距離は約一〇パーセント増えるから、かえってオーバーランの危険性を高める。濡れた滑走路でも一〇〇パーセントフラップを

使って接地速度を最小にする方がよい、というものである。このように、パイロットと自動操縦の間のオーソリティ（権限）の配分を巡って、メーカとユーザの間で意見が分かれることがある。そのとき、設計側の硬直した姿勢が問題解決のための障害になる。

ベテランも新人もない

技術革新が起こると、過去に蓄積した経験は通用しなくなるから、ベテランパイロットも新人パイロットも同じように事故を起こす。とくに、古い技術と全く共通性をもたないロジック操作とモード選択では、ベテランも新人も同じように混乱する。次に、その典型的な例を示そう。

一九九四年六月三〇日、ツールーズで試験飛行中のA330が離陸に失敗して墜落した。この試験飛行は離陸直後のエンジン故障を模擬したもので、その日の三回目の飛行であった。

最初の二回の離陸はエアバスの主任テストパイロットのニック・ワーナー機長が操縦し、片方のエンジンの故障を模擬したゴーアラウンド（着陸のやり直し）を行った。これは着陸直前に右エンジンのパワーを最大まで上げ、左エンジンは故障を模擬するためアイドル（推力が出ない回転数まで落した状態）にする。左右のエンジン推力が極端にアンバランスになったため、機首が左を向こうとするのを、ラダーを操舵して抑えると同時に、大角度に下げていたフラップを小角度に戻し、自動操縦を一定の基準速度を維持するモード（SRS）に入れて、設定された高度ま

で上昇するというものであった。二度ゴーアラウンドを行い、いずれもうまくいった。

着陸後、次のテストは副操縦士に操縦を任せた。この副操縦士は国内線を運航するエール・アンテール航空のミカエル・ケイス機長で、エアバスの訓練機関であるエアロフォーメーション社で訓練中であった。この会社は現在ではエアバスに編入され、その訓練部門になっている。

この日、ワーナー機長は超多忙であった。A321のデモ飛行をやり、シミュレータ・セッションを主宰した。そのあと日本のテレビ会社のインタービューがあった。これは二ヵ月前の中華航空機墜落事故の余波とみられる。他にもう一件のインタービューにも出席した。この休む暇もない多忙なスケジュールを消化した後で、このむずかしい試験飛行に臨んだのである。多忙であったため、ブリーフィング（事前に乗員間で行う飛行計画の打ち合せ）も時間がとれず、離陸しようと誘導路を走行中、副操縦士から試験内容についての説明を受けただけだった。

前の試験飛行がうまくいったので、事故になった三度目の離陸では機長は気が緩んでいたのかもしれない。計画では推力は絞ってFLEX49に設定することになっていたが、機長は誤って最大定格推力値の離陸推力に設定した。このFLEX推力とは何かを説明すると、離陸重量が軽くてエンジンをフルパワーにして離陸する必要がないときは推力を減らして離陸するが、その推力設定の一つの方法がFLEX温度という仮想の温度をパラメータに使う方法である。仮に空港の気温が標準一五度Cより高いとき、エンジンが出し得る推力は一五度Cのときに出せる最大定格

推力よりもかなり低い。気温四九度Cのときに出せる推力がFLEX49である。
推力設定値が大きかった結果、片方のエンジンの故障を模擬したときの左右の推力アンバランスが計画より大きくなり、方向維持が困難になった。
スタビライザトリムの設定も適切ではなかった。スタビライザのトリム角は重心の位置によって変わる。普通、乗客と貨物を積むとき重心がやや前にくるようにして（普通は主翼の前縁から三六パーセントくらい後方）、機首がわずかに重い状態にする。スタビライザは二度程度機首上げ側に角度をとって、この機首下げの傾向とのバランスをとる。これがトリムがとれた安定な状態である。ところが、事故機では重心位置が四二パーセントといつになく後方にあったから、スタビライザのトリム角は零度くらいでよかったのに、通常のように二度にした。これでは機首上げの傾向が出る。
エアバス系の航空機ではトリムがとれた状態では、スティックには力を加えなくてもよいことは、第一章の自動トリムの項で説明した。だから、ピッチは小さな力で変えられる。また、重心が後ろにあるとスティックの操作に対してピッチは過敏に反応するから、過大な機首上げを起こしやすい。これに対しボーイングの航空機では、操縦輪に加えなければならない力が大きい（舵が重い）ので、不注意での過大な引き起こしが避けられている。
事故機の場合、この三つの不利な条件が重なり、さらに副操縦士がスティックを引いて積極的

な、非常に速いローテーションを行ったため、機首が上がり六秒後ピッチは約二五度になった。この状態で機長が試験項目にあるとおり自動操縦のスイッチを入れた。このとき操縦モードは前の試験飛行の条件のまま、高度獲得モード（ＡＬＴ　ＡＣＱ）になっていたことも、事故原因の連鎖の環の一つになった。なぜなら、高度獲得モードでは飛行管理コンピュータに上昇率があらかじめ設定されていればその上昇率で上昇するが、設定値が空白のときはモードが活動を開始した時点での上昇率を記憶し、それを維持して上昇する。ところが、その試験飛行では離陸重量が軽かったことと（乗客は四人だけ）、ピッチ角が二六度にも達したことが重なって、通常の四〜五倍の一八〇〇メートル／秒という大きな上昇率が記憶されていた。この上昇率を維持するには、両エンジンが正常の推力を出していれば問題はなかったが、機長がエンジン故障を模擬するため左エンジンをアイドルまで絞った。

このような状態で上昇率を維持するには速度を減らすしかないから（図1―23）、自動操縦システムは機首上げを命令したため、離陸して七秒後にはピッチ角は二九度に達した。抗力が増したため速度は急激に落ち、一六秒後には時速二〇九キロを切ってさらに減速を続けた。この速度はV_{MC}を割り込んだ。

V_{MC}とはなにか。片方のエンジンが止まった時機首は横を向こうとするが、ラダーを反対側へいっぱいに操舵してそれを防ぎ、方向の維持をする。速度が遅いと舵面の効きが低下するから、あ

る速度以下では方向維持ができなくなる。この限界の速度がV_{MC}で（事故機では二一九キロ／時）、事故機はV_{MC}をすでに一〇キロメートル／時も下回っていたから、ラダーをいっぱいに操舵しても機体の方向維持は不可能であった。

　機長はそのとき、ようやく速度が失速ぎりぎりにまで下がったのに気づき、「どうなっているんだ？」と叫んだ。それまで機長は飛行試験の手順に忙しく、飛行状態が今どうなっているかに注意をはらわなかった。ピッチが二五度を超すとオートパイロットのモードの表示がフライトディレクタから消えるようになっている。このこともあって、パイロットは今どの自動操縦モードで飛んでいるかを知らなかったのである。

「副操縦士はオートパイロットが入れられて、飛行試験項目に入ったとき、パイロット・イン・フライト（操縦担当）の仕事から解放されたものと思ったらしい」と事故調査委員会は推測している。短い時間ではあるが、二人とも緊急事態に対処できない操縦の空白が生じた。一九秒後にワーナー機長は自動操縦を切って手動で操縦を引き継ぎ、スティックを前に押しラダーを右いっぱいに切ったが、ピッチは三一・六度になり左の翼は失速し、機首は左を向き、左翼が下がり始めた。次に機長は左右の推力のアンバランスをなくすために右エンジンもアイドルに絞った。二五・五秒後には速度は一四三キロ／時に減り、機首は一五度下を向いて、なお下がり続け、翼は左に四三度傾き、その後一一一度に達した。

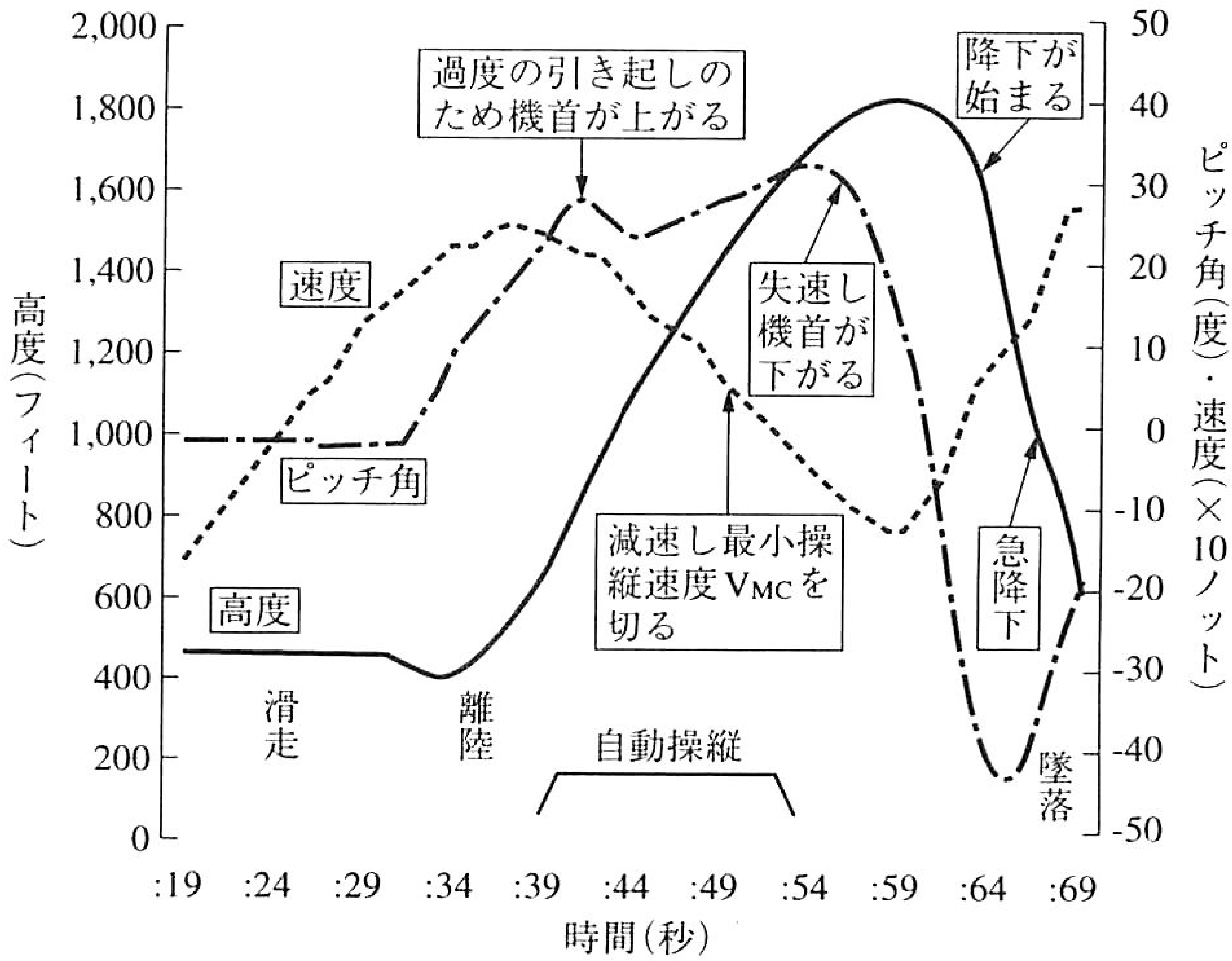


図 2-13　A330の飛行データ（ツールーズ事故）

結局、機は左へ一八度バンクし、一五度機首下げの姿勢で地面に激突した。乗員三人と、同乗していたアリタリア航空の職員四人の、計七人全員が死亡した（図2―13）。

この事故は、先に述べたように多くの要因が重なって起こったが、致命的な原因は高度獲得モードでピッチ・プロテクション（ピッチ角が限界を超えるのを抑える機能）が働かなかったことである。前項で述べたバンガロールでのインド航空A320も同じ原因で墜落したが、その経験は生かされなかったわけである。エアバス社はこの事故の後、A330を運用している航空会社に「エンジンが故障したら、自動操縦を切ってピッチ角を制限しなければならない」

と文書で伝えた。固いプロテクションを誇るエアバスのハイテク機には、このような落とし穴が隠れていた。

エアバスインダストリは、この事故はエンジン故障時にカテゴリIII（第一章「ウェザー・ミニマ」の項　40ページ参照）の着陸の認定を受けるための、きわめて特殊な運航条件で起きたもので、通常の運航では起こり得ない事故だと弁明したが、自社のトップクラスのテストパイロットが起こしたこの事故から、かなりの衝撃を受けたようである。ジーグラー技術担当副社長はそれがエアバスのプロテクション・システムのなかの穴であることを認め、「われわれはこの穴をふさぎ、過渡段階でもプロテクションが働き続けるようにすることに決めた」と語った。

エアバスインダストリは、以前は事故が起きるたびにパイロットの規律違反を批判してきたが、この事故以来、エアバスを運用するエアラインを対象とする秘密報告制度を発足させ、ユーザの意見を聴く姿勢に変わった。この秘密報告制度は航空機メーカでは最初のものである。また、最近、米国の大手エアラインの安全担当重役をやめた航空機事故対策の専門家を招いて、安全管理体制を強化した。

カオスの縁

ではプロテクションが破れて危機的な状態が迫ったとき、パイロットが主体性を発揮して航空

機を操縦するためには、どんな問題があるだろうか。
航空機の姿勢が定常な状態からずれて振動をはじめたとき、パイロットがそれを修正しようとして操舵すると、操舵と航空機の振動の位相がかみ合わずに、かえって振動を増幅してしまう。これはパイロットが誘起する振動（ＰＩＯ）と呼ばれる。ヨーとロールと横滑りの三つの自由度の運動が連成したダッチロールはその代表例である。
ＰＩＯという用語には、不器用なパイロットが起こすものというニュアンスがある。現代のコンピュータコントロールの航空機でもＰＩＯに似た現象が起こるが、現代のハイテク機ではコンピュータが操縦のかなりの部分を受け持っているから、パイロットにだけ責任を負わせることは正しくない。そこで、米国の航空宇宙局（ＮＡＳＡ）の研究者たちは、ハイテク機で起こるこの種の事象を、航空機―パイロット結合（ＡＰＣ：Aircraft-Pilot Coupling）と名づけた。
米国の国家研究審議会（ＮＲＣ：National Research Council）は、ＮＡＳＡの委託でこのフライ・バイ・ワイア機に起こるＡＰＣについて調査した。その調査報告書によれば、ほとんどのＡＰＣは設計エラーの結果である。フライ・バイ・ワイア航空機ではパイロットは運動や回転の速度を実感できない。また操舵しても、いつ舵面が最大偏角に達するかがわからない。このことからパイロットの予想と実際の航空機の応答が食い違うことが、ＡＰＣの発生原因になる。新しく開発されたほとんどすべてのフライ・バイ・ワイア機は、開発のある時期にＡＰＣを起こした

という。この事象はパイロットが機体を正確にコントロールしようと懸命になっていて、負担がすでに異常に高くなっているとき、パイロットの仕事を妨害する過渡的な事象が起こると、それが引き金になって起こる。

この引き金になる事象が、パイロット―航空機系のダイナミックスを変える。最も普通に起こるのは飛行制御システム（FCS）のゲインの調整ミスである。フライ・バイ・ワイア機ではパイロットによる操縦スティックやホイールの操作は、そのままエレベータやラダーに伝えられるのではなく、まず電気信号に変換されて制御コンピュータに送られ、そこから駆動用アクチュエータに信号が出力される。このパイロットからの入力を操舵量に変える比率がゲインである。これが大き過ぎると機体の応答が過敏になり、不安定な運動になる。

そのほか引き金作用に含まれるものには、パイロットの指令信号の振幅の増大、FCSの変更、些細(ささい)な機械的故障、激しい大気擾乱(じょうらん)などがある。また、最も心配されるのは「断崖状の特性」と呼ばれる現象である。「断崖」の手前までは万事がすばらしくよく動いているが、「断崖」まで来ると破局的な現象が始まる。前述のAPCがそれである。設計者が教訓としなければならないことは、操縦制御システムモードの間で転移を行うとき、それがパイロットが期待することと矛盾してはならないということである。

NRCの報告書は、結論として、APCを発見し予防するための最も重要な設計手段は「シミ

ュレーションと解析によって、予期しないトリガー事象とパイロット―航空機の相互作用を探し出すことである」としている。

この報告書でいう断崖状の特性は、最近話題になっている「複雑系」の「カオスの縁」の現象に似ている。複雑系では状態を変化させる多数の規則のそれぞれにラムダ・パラメータという計数が対応していて、このパラメータのある臨界値を境にして、安定パターンになるか複雑なカオス的パターンが発生するかが分かれる（吉永良正著『「複雑系」とは何か』講談社現代新書）。航空機では飛行包囲線がこの「縁」に当たる。低速側の縁では、翼の迎角が失速迎角に達するまでは、トリガーがあっても翼と操縦舵面に働く空気力は規則的に変化し、機体姿勢のコントロールはよく保たれるが、この縁を超えるとトリガーの種類によっては空気力が無秩序に変化してコントロール不能になり、カオス状態になって機は墜落する。やみくもにプロテクションをかけてもどこかに抜け穴ができることは、ツールーズでのA330の墜落事故が教えている。どのトリガーがパイロットの弱点を突くかを見極めて、そこに重点的にプロテクションをかけ、パイロットに任せた方がよいものはそうすることが重要なのである。

高度な操縦術

これまで述べてきたように、自動化によるプロテクションの穴をパイロットに塞いでもらわな

ければならないのが、技術の現状である。米国のユナイテッド航空では、正常な飛行範囲から外れた状況での操縦法を訓練カリキュラムに組み込んでいる。この特殊な操縦技術を同社は「上級操縦パッケージ（AMP：Advanced Maneuver Package）」と呼んでいるが、次の条件下での操縦を含む。

（一）山岳波や大型機の後流に入ったときのような、極端なバンクやピッチ姿勢を起こす異常状態

（二）不注意で起こした完全失速。普通は、完全に失速したらどのような運動が起こるかは教えていない

（三）離陸直後、またはゴーアラウンド（着陸のやり直し）中にエンジンが故障したときのような、低エネルギ状態（速度エネルギ、位置エネルギ、エンジン推力が共に低い状態）。普通は離陸決定速度V_1前後の離陸継続／中止の訓練に主眼を置く

この操縦パッケージは異常姿勢からの回復のための操縦操作にだけ重点を置き、エンジン推力や抗力の調整のような直接効果がない操作は含んでいない。それだけせっぱ詰まった事態を想定したものである。同社のウォルター飛行基準部長は「わが社のパイロットはこの訓練を歓迎している。これこそ彼らが必要としていたものだ」と語っている。別の米国の大手エアライン、アメリカン航空も同様な上級操縦訓練プログラム（AAMP）を実施している。

このように、米国ではパイロットは最後の砦であるという伝統的な考え方が、根強く生きている。そのことは、一九八九年にアイオワ州スー・ゲート空港で起こったユナイテッド航空機の事故でパイロットたちが発揮した英雄的な行為が、繰り返し語られることにも現れている。このDC10型機のパイロットたちは、尾翼に付いている第二エンジンが疲労破壊を起こして作動不能となり、さらに操縦系統の油圧配管がすべて断ち切られて機が操縦不能に陥り迷走を始めたとき、残る二つのエンジンの推力をコントロールしてこの空港に緊急着陸を行い、過半数の乗客の命を救った。詳しくは前著をご覧いただきたい。どんなに技術が進歩しても、事故は絶無ではない。そのときはコックピットのなかの有能で献身的な人たちに頼るしかないのである。

最近、航空機事故におけるヒューマンファクターズ（人間的要因の引き起こす問題）が世界の航空輸送界で注目され、人的要因から起きる事故を予防するために、パイロットから異常運航の情報を集めて原因を分析し、運航安全に役立つ指針を得ようとする計画が進められている。米国が推進しているものはGASN（世界航空情報ネットワーク）と呼ばれる。これは秘匿性と非処罰を保証するという条件のもとに、標準的な運航から逸脱した、いわばパイロットのエラーを自発的に報告させる制度である。しかし、確かにエラーは反面教師であり、この種の情報収集も意味がないことはないが、いかにも後ろ向きで情報を提供する側に心理的抵抗がある。また、得られた教訓は行動規制的である。

それよりはむしろ、悪くすれば事故につながったトラブルを、パイロットがすぐれた状況判断力と行動によって回避できた積極的事例を集めたらどうか。一〇〇万回の離発のうち九九万九九九八回は着陸に成功しているのだから、このような例は多いに違いない。そこから引き出される情報は事故防止のための行動的な指針になる。この意味で、わが国で機長の危機管理能力を発揮した事例や、危機的な飛行からのサバイバルをテーマにした本が発行されているのは評価できる。いずれ、このような方向の努力が実って、ユナイテッド航空のＡＭＰパッケージに類した、システム性事故回避のための操縦スキルが集大成されることが期待される。

訓練強化か設計見直しか

自動操縦と航法の自動化のために組み込まれる機能とモードの数はますます増え、パイロットにはそのための教育と訓練が必要になる。しかし、そのために訓練時間が大幅に増やされた話は聞かない。それどころか、自動化の結果仕事量が減ったのだから、訓練時間の短縮が可能だという意見さえある。

しかし、全日空の永倉機長は「自動着陸は簡単だという考えが蔓延(まんえん)している。それは誤解だ。自動着陸は非常にグレードの高い運航をパイロットに求めている。機械でコントロールすることは、それを理解するという今までと違った高い能力を求められる。自動化はハード面で自動化し

やすい部分から実施され、ワークロードの低い飛行フェーズではますますワークロードは低下した。一方、離着陸フェーズでは困難性のため自動化は円滑に進まず、事故発生率は依然として高い」と、ある講演会で述べている。

新しい技術が導入されるのは、いつもより高い目標を達成するためであって、人間が楽をするためではなかった。そのための技術は「人に優しい」ものにはなりにくい。航空輸送の場合、この目標とは高い経済性と就航率とを安全性を損なうことなく達成することである。現在年間一五〇〇万回出発した定期航空旅客機のうち、死亡を伴う事故を起こすものはわずか二〇機程度である。しかし今は十分低くなっている事故率であっても、このままいけば二〇一〇年には毎週一回、死亡事故が起こるという予測もある。この予測をもとに、事故率をいまの五分の一に減らさなければならないという勧告が、ゴア副大統領を長とする米国大統領府の航空安全保安委員会から出された。それは政策的な数字であるにしても、事故ゼロを目指すこととほとんど変わりがない。

そのためにはどうするか。高度化した機械と調和するレベルまで、パイロットの技量を高めなければならない。だが訓練が長期化するのは、一般に好まれない。そこでそれを短期で済まそうとすると、基本的な自動化機構の操作知識だけで初期訓練を終えた乗員たちは、その先の専門知識はオン・ザ・ジョブ（仕事をしながら）で習得することになる。

その上、訓練の内容には新しい項目が増えた。自動化とともに深刻になったヒューマンファクターズ（人間的要因）による事故を防ぐために、どのエアラインも乗務員の相互のコミュニケーションと協力関係を強化することによってパイロットの状況認識を維持し、それによって安全性の改善をはかる、コックピット・リソース・マネージメント（CRM）の訓練を充実強化しているのである。

この種の訓練は重要なことではあるが、その効果は、個性化がますます進み機械との孤独な対話にふけりがちな今日の社会の若者たちを、辛うじて人と人との協調に引き留めるのだけで精いっぱいではなかろうか。それはヒューマン・コントロール（人間性に対する働きかけ）である点で、問題なのである。

これについて英国民間航空局のテストパイロットのニューマン機長は「訓練を増やすことが最善の策ではない。短期的には、われわれを苦しめている設計上の問題事項を処置することが、十分な弾力性をもつただ一つの解決策だ。……システムはエラーを誘発するおそれを最小にするよう設計されるべきだが、同時に起こるエラーを許容することができるものでなければならない。人間からのインプットを必要とし、人間的エラーを起こすおそれのあるいかなるシステムの設計に対しても、標準を設ける必要がある」という意見を王立航空学会のセミナーで述べている。

これは重要な意見である。この意見に付け加えるとすれば、機械だけの設計改善はすでに限界

にきていること、そして人間と機械をシステム・レベルで調和させる方向での設計改善が必要なことである。ここで「コンピュータ対人間」という最も困難な問題が表面に出てくる。
次章ではこの問題について考察する。



第三章

コンピュータと人間

前章で述べたように、コンピュータはその優れた能力のためコックピットのなかで強い権限を握るようになった。その結果、人間とコンピュータの間に軋轢(あつれき)が生じ、それが新しいタイプの事故原因となって現れた。これまでの一〇年間のハイテク機の運用経験を踏まえて、いまやコンピュータの役割はいかにあるべきかを見直す時期にきている。

この章ではこの問題を検討しよう。

コンピュータ・リテラシ

英国の王立航空学会が一九九五年秋に開催したエアライン・パイロット訓練に関する講演会で、英国のキャブエア航空大学の先生をしているホイ機長は「明日のエアライン航空機はより多くのコンピュータ・リテラシ(コンピュータで読み書きする能力)が必要で、スティックやラダーの調整操作は、多分、強い横風で着陸するとき以外は、ごくまれにしか必要でない」と述べた。さらに、コンピュータが操作でき大量の情報を記憶できる人をパイロットに選ぶ必要があることを強調した。また、「今の訓練プロシジュアは実世界の要請に応えていない。例えば、現行の計器飛行証明の試験では独力で処理する能力を実証することが要求され、その結果、他のクルーとの非協力の考えを奨励している。……飛行の原理の基礎知識をもつことが役に立つのは明らかだが、飛行管理コンピュータについてのしっかりした実践的な知識と、緊急の際、それをプロ

グラムし直す方法を知ることは、地面効果が誘導抗力にどう影響するかを知ることよりも、はるかに価値がある」と講演した。

著者は最近まで訓練生に苦労して誘導抗力を教えていたので、この後半の指摘は、愉快ではないが、正しいと思う。そのような性能データを記憶させるのは、コンピュータの方がはるかに適している。しかし、機長がごく希にしか起こらないと言った「スティックやラダーの調整操作が必要になる場合」にも、事故はよく起こっている。そのときはコンピュータ技師のようなパイロットではどうにもならない。したがって、この希な場合に対する準備を切り捨てることは、事故を増やすことになる。

しかし、このような講演がパイロットの一人によって行われたことは、パイロットに必要な知識が航空工学よりも情報処理技術に変わったこと、それに伴って航空機の操縦の考え方も根本的に変わりつつあることを実感させる。実際、自動化されたコックピットではエンジンの状態その他のあらゆる生データはコンピュータによって処理され、飛行機の現状と将来は加工されたデジタル、あるいは画像情報としてグラフィック表示される。また、回避すべき危険に対する警告として、音声やシグナルにより伝達される。その場合、なにを、どう表示するかはソフト制作者の意図によって取捨選択される。こうして、パイロットは設計者がコンピュータを使って作り出したバーチャルリアリティ（仮想の現実）の世界で航空機を飛ばすことになる。

これは航空機に限ったことではない。科学技術は自然を作り変えてしまった。我々の住む環境は鉄とコンクリートとに囲まれ、各種のエネルギ供給系統と情報ネットワークは機械化され、情報化された社会生活を支えている。見るものはほとんどが人工物で、公園の緑さえも疑似自然である。このことについて、今世紀初めの偉大な科学者であり哲学者でもあったハイゼンベルグは、「われわれはいたるところで人工物に、つまりわれわれ自身に出会う」と予言したという。

この見方をとれば、パイロットはコックピットのなかで、それを作った設計者という人間と向かい合わなければならない。さらに、設計者の背後には企業経営者、規制官庁がおり、その後ろには航空に対しさまざまな要求をもつ一般大衆がいる。このようにして、パイロットはコックピットのなかで現実社会と向き合うのである。そして、この社会の要求は自動化を必然とするほど複雑で高度になっている。パイロットがコックピットのなかで発揮する人間学的特性、いわゆるヒューマンファクターズは、裏を返せば、この自動化機械を生み出した社会とパイロットの間の相互作用の結果なのである。

現在の自動操縦技術が人間の仕事を機械で置き換える場合、人間の機能をそのまま模倣しようとしてはいない。感性（あるいは情動）は人間としてのパイロットの動機付けにたいへん重要ではあるが、コンピュータ技術者は感性や情動には無関心で、というよりは手がつけられなくて、知能だけに関心をもつ。それは、知能だけがコンピュータの特質に対応しているからである。こ

人　　間	機械(コンピュータ)
・状況依存型 言葉の意味は前後関係、文脈によって決まる。	**・普遍論理思考型** 言葉の意味は独立、客観的に決まる。
・個別具体性	**・抽象性** 記号による論理操作。
・並列処理型 多数の脳神経細胞の一つ一つがCPU(演算装置)と記憶装置を兼ねた働きをする。	**・逐次処理型** CPUは1つで、命令を一つ一つ順序立てて処理する。記憶装置は別にある。
・ファジー 日常言語には特有のあいまいさがある。虚構性ともいえる。	**・完全一致** 使用する言語は閉じた世界を作る。それ以外の言語は受け入れない。

表 3-1　人間と機械の言語・情報処理の違い

のように、人間のどの部分を模倣するかは技術が決定するのである。この「必然的な技術指向性」が問題を起こすのは、常に感性をもつ人間とコンピュータのコミュニケーションにおいてである。

人間は言葉によって考える。人間の話す自然言語とコンピュータ言語の間に共通性がないことは人間と機械の意思疎通の障害になる。表3―1に人間と機械(コンピュータ)の言語(思考)の特徴を思い付くままに比較してみた。このように、人間とコンピュータの言語の間には、かなりの違いがある。人間の言葉はその話のなかの文脈(前後関係)によってさまざまな意味をもつが、コンピュータの言語は一義的である。人間は曖昧な表現のなかからでも有意の情報を引き出す能力をもつが、コンピュータは完全な語法に従った表現しか受け入れない。つまり、一点一画間違いない言葉しか理解できない。この完全一致の条件が、緊急

時のモード切り替えのとき慣れないパイロットがミスを犯す原因になる。この不便さは、人間と機械を仲介してくれる知能的なインターフェースが開発されなければ解消しないであろう。しかしこれは人工知能開発が停滞気味の現状から見て、そう近いことではあるまい。したがって、現状としては人間の側がコンピュータに近寄る、つまりコンピュータのロジックに習熟するしか手はない。それで、コンピュータ・リテラシが強調されることになる。

設計者が操縦する航空機

「人に優しい技術」という言葉があるが、技術が人に優しかったためしがあるだろうか。新しい技術が導入されるたびに、人々はそれに適応するために懸命の努力をしなければならなかった。

従来型の旅客機では各機器がほぼ独立に飛行制御、飛行管理、航法などの機能を果たした。このような分散型構造のシステムでは、統合されたシステム管理はパイロットに任せられていた。ところが、新しい世代の航空機では、中央の高性能コンピュータがほとんどすべてのサブシステムを管理する集中型構造に変わった。これまでパイロットの本領とされていたナビゲーション（航法）までが、この統合化されたシステムのなかのサブシステムの一つによって行われる。いってみれば、中枢コンピュータに隷属した操縦ロボットがコックピットに入り込んで真ん中に座っているのである。そして、このロボットはソフト設計者の考えに忠実な奴隷である。

ハイテク機では、ロジック操作と情報の入出力によってこのロボットとコミュニケーションするのがパイロットの仕事の重要な部分であるから、設計者の考え（コンセプト）が明確にパイロットに伝わっていなければならない。コンピュータが大きな権限を持つようになればなるほど、設計者とパイロットが共通の理解と価値観を持つことが重要になる。はたして実際はそうなっているだろうか。

Ａ３２０は一九八八年に就航して以来、何度か事故を起こし、そのつど自動化の行き過ぎが問題になった。Ａ３２０のソフトウエアを開発したエアロフォーメーション社（現在はエアバス社の教育訓練部門）の社長ジャン・ピネーは、「我々はコンピュータ化のすべての利点を推し過ぎるわが社の技術者と戦わなければならなかった」と述懐している。エアバスの設計陣が、世界に先駆けて民間航空機に自動化コックピットを実用化しようと意気込んだ様子を窺うことができる。

自動操縦のソフトウエアは、大勢の設計者が自動制御理論とコンピュータによる情報処理技術の粋を尽くして作り上げたものではあるが、これまでパイロットが行ってきた操縦とは異なるものであった。いや、異なるものかどうかうかがい知ることができないほどにブラックボックス化されている、と言ったほうが正しい。これに関してピネー社長は、「我々の立場はしっかりしている。教え過ぎると混乱が起きる」と話している。この言葉は、余りにも多くの難解なロジック

が使われているため、パイロットにそれを全部理解させることはいたずらに訓練時間を増やすばかりか、「中途半端な知識を教えることは、かえって誤りを招く」という考えを述べたものであろう。決められた手順に従って操作することをパイロットに厳しく求めるようになった事情を物語っている。

従来、パイロットはコックピットのなかで起こることは自分たちが最もよく知っていると自負し、「地上で安楽椅子に座ってものを言う先生がた」の意見を無視する傾向があった。ところが、いまパイロットはコックピットのなかを完全に把握できているであろうか。そうではない。パイロットたちは定められた手順に従って操作することを求められてはいるが、どのような状況で、なぜその操作が必要とされるかについては、必ずしも十分には知らされていない。日本エアシステムのある機長は、このことを「ＥＣＡＭの猿」と表現した。ＥＣＡＭとは、図1－19に示した電子式集中型モニタ装置のことである。つまり、パイロットはおかしいと思っても設計者の意図に従うしかない状況にある。

飛行システムや運航プロシジュアが完全で、パイロットのミスだけで事故が起こることはごく希(まれ)で、そのシステムやプロシジュアに潜在する他の原因が事故の引き金になっていることが多い。そのときパイロットはこの潜在的欠陥を補うべき立場にあるが、システムをよく知らず、疑うことを知らないパイロットにとっては、その欠陥は避け難い「落とし穴」となって待ち構え

る。ところが、メーカや会社側はこの隠れた欠陥が疑われる場合でも、システムやプロシジュアを変えようとはせず、操縦する人間の振る舞いの方を変えようとする。このメーカの姿勢について、パイロットたちはどう考えているのであろうか。

このことについて英国航空の安全部長のコーリン・シーマン機長は、「新しい技術に遅れないように自らを再設計せよとパイロットに迫るのは、犯罪的とまではいえないまでも、不合理なことに思える。わが業界は、注意しないと、パイロットが飛ばすのではなく、設計者が飛ばしたい飛行機を作るような方向へと動いているようである。この流れは何としても押しとどめなければならない」と批判している。パイロットもいまのままの自動化を喜んで受け容れているのではないのだ。

しかし、パイロットは自分たちが操縦する航空機に採用された新技術を、冷たく突き放すことはない。彼らは誇り高いプロフェッショナルであって、常に先端技術にフォローできることを誇りにしている。技術を批判することよりは、それに習熟することに関心がある。指導的な立場にある優秀なパイロットほど、この傾向が強い。アプセムで事故を起こしたA３２０のアスリーヌ機長はその典型である。「技術に多少の問題はあっても、規律と訓練によって対処できる」という意見が聞かれるのは、この人たちからである。

しかし、このような優秀なパイロット側からの対応だけでは、新しい技術の成熟に不可欠な、

現場の実態を設計へ正しくフィードバックする道を閉ざすことにならないか。また、常に多数者である底辺にいるパイロットのモラルを低下させ、運航の安全を損なうことはないか。

コンピュータは机上で仮構の世界を創出するには適しているが、現実の航空交通空間を飛ぶためには、人にきわめて厳しい技術であるというのが実感である。なぜならば、それは人間の能力の強い部分よりは、むしろ、弱い部分に負荷をかけるからである。パイロットの訓練で事故の要因としてヒューマンファクターズが強調され、認知心理学が必須課目として入ってきたのは、パイロットに自己の弱点を自覚させ、警戒心を植え付けるためである。しかし、人間は過ちを犯すものであると教えられると、過ちを犯さなくなるものだろうか。認知心理学はそうではないことを教えていると著者は理解している。「過ちは人の性（さが）」であることは、本来、設計者が学び、設計において配慮すべきことなのである。

コンピュータ化についていけない人々

米国定期航空パイロット協会（ＡＬＰＡ）の安全担当副会長でノースウェスト航空のリチャード・ダックスバーグ機長は、ノースウェストのパイロットたちがＢ７５７とＢ７４７―４００のグラスコックピットと最初に出会ったときの戸惑いを、次のように語っている。

「われわれはグラスコックピットや新しい記号やコンピュータに適応しなければならなかった。

コンピュータとオートメーション関係の新しい用語を卒業できないパイロットがいた。訓練終了が遅れたパイロットの何人かは、以前乗っていた航空機に戻った。このタイプの飛行が楽しめなかったからだ」

実際、コックピットには聞き慣れない言葉がどっと入り込んで来た。コマンド、エグゼキュート、デリート、デフォルト……。パイロットはもはや情報処理技術者の仕事をしているのである。古参のパイロットはそれが大嫌いだ。

従来型機では操縦桿は舵面の動きに対応して動き、また操舵に必要な力はパイロットにリアルなコントロール感覚を与えていたが、新世代機には操縦桿と舵面の動きが対応しないものがある。前述したように、エアバスA320のサイドスティックはほとんど動かない。パイロットがそれに加えた力がコンピュータに入力される。このスティックは単なる信号電圧発生器なのである。しかし、この新型機の乗務に移った当座のノースウェスト航空のパイロットたちは、サイドスティックが好きになったという。この人たちもスラストレバーが動かないのには最初は面食らったが、路線運航で使ってみたあとでは、「スラストレバーの位置を見るよりもエンジン計器をチェックするようになり、その方がエンジンの作動状況をよく認識できる」というものも出てきた。多分、このパイロットたちは適応力のある人たちであり、また前述したCスター制御が気に入ったせいかも知れない。

新技術への適応能力に個人差があることは確かで、将来は適材の選抜と訓練によって改善される見込みがある。しかし、現在のパイロットたちの技量によって達成されている安全性のレベルは、少なくとも維持しなくてはならない。公共的な輸送では技術的冒険主義は許されないからである。この立場からすれば、パイロットに操縦感覚を与える必要はなく、コンピュータの入力さえマスターできれば足りるとする設計思想が肯定されるかどうかは、実践の場で問われなければならない。

コックピット内の人間関係も変わった。人と人との間にコンピュータが入り込んできたため、コンピュータとのコミュニケーションに多くの時間が費やされるようになり、逆に人間同士のコミュニケーションは希薄になった。たしかに自動操縦が正常時に働いているときは、ロジック操作に時間をかけてもよいし、隣の男とのコミュニケーションもそれほど緊急のものではない。問題は異常が発生して、頻繁にパイロット同士やコンピュータとコミュニケーションしなければならないときである。それをしないと、航空機が思いもかけない運動を始めたあとになって、驚くことになる。自分がキーボードでなにをコンピュータに入力したかを隣の男に知らせ、その男になにを入力してほしいかを知らせなくてはならない。このように常時クロスチェックをしていないと、自動操縦システムが今なにをしているのか、またどこへ行こうとしているのかよくわからない。しかし、あとに述べる情報の記号化とロジック操作がそれを困難にしている。

アフォーダンス人間

　空を真っ黒に覆う鳥の大群が、右に左に舞い飛んでいるが、羽を接するほど接近して飛んでも、衝突する鳥は一羽もいない。薄暗くなるとこうもりの群れが飛び始めるが、暗くて地面が見えなくても、衝突したり墜落したりはしない。それはなぜだろうか。

　それはこの動物たちの知能が発達しているからではない。むしろ、大脳皮質はそれほど発達していないが、その代わり視覚や聴覚などのセンサが非常に発達していて、環境からさまざまな情報が与えられるから、それに直感的に反応して素早く行動しているのである。決して飛び方をいちいちプログラムし、また過去の経験をデータベースにして脳に蓄えているわけではない。

　このように、次の行動を起こしても大丈夫かどうかを判断するための情報を環境から直接与えられることを、心理学では「アフォーダンス」というらしい。

　慶應義塾大学の石井威望教授は心理学でいう「アフォーダンス」に関連して、「これまで情報は文字情報にせよ図形情報にせよ、大脳皮質で抽象化、記号化されたものばかりが扱われてきた」と指摘したうえ、昆虫は大脳皮質はほとんど発達していないが、そのかわりセンサが非常に発達していて、つねに環境から情報を受け取り、それに基づいて素早く行動していることを例に挙げている。そのうえで、「アフォーダンス」とは「次の行動を起こしても大丈夫かどうか判断

するため、環境から直接与えられる情報」であると解説している。
昔の映画に『ターザン』という野性的な人間を主役にしたものがあったが、ターザンは「アフォーダンス人間の代表だ」というのが、石井氏の意見である。考えてみると、パイロットも以前はアフォーダンス人間でよかった。ところが、自動化が進みそれが航法にまで及んでくると、視覚と聴覚以外の体感とか嗅覚（きゅうかく）などの情報は切り捨てられ、パイロットは大脳皮質で抽象化し記号化された文字情報や図形情報ばかりを処理しなければならなくなった。
「現実が法則や方程式に還元され、バーチャルな世界が作り上げられると、アナログモデルなしにどんどん先へ進むことができる。しかし、いちいちアナログモデルに立ち返る必要がないと、人は物事の本質を理解しようとはしなくなる」というのは、フランスの経済学者アラン・リピエツ氏がある新聞社主催の討論会で述べた言葉である。これは、いまコックピットのなかで進行している情報化の実態でもある。
リピエツ氏の批判に対し、「デジタル化は（五感を）切るのが目的ではない。ただし、アナログを超えようとするあまり、論理性を重視し過ぎて『切る』ことになってしまった」という意見が、他の講師から述べられた。
航空機の場合、これほどの変革がなぜやすやすと受け入れられたのであろうか。それは一つには、設計についての情報が企業秘密保護の厚い壁で開示されず、ブラックボックスのなかでひそ

かに進行したためである。残念ながら、いまだにその状態は続いている。二つには、直接のユーザであるパイロットは、新しい技術にいち早く適応しようとする志向が強い人たちであることである。どちらもそうしなければ仕事にならない以上、それは当然といえる。したがって、事故が起こって初めて、実態があらわになる。これで技術の健全な発展と言えるだろうか。

記号化貧乏

今日、パイロットはディスプレイ装置で埋まったコックピットのなかで、記号と画像に囲まれて仕事をしている。操縦に必要な情報の多くの部分をコンピュータからの情報に頼っており、キーボードの操作と画面のモニターに多くの時間をとられ、外界を見ることが少なくなった。いったい、パイロットには十分な情報が与えられているのだろうか。

ブック・プレイヤとか電子ブックというものが売られている。ある出版社の二六冊の百科事典全部が、たった一枚の八センチCDに納められているのには驚かされる。しかし、音楽ならCD一枚に一時間分しか入らないことに気づくと、今度は、音に含まれる情報量がいかに多いかに再び驚かされる。百科事典一冊に納まっている情報が、わずか二分間余りの音楽と同じとは。

われわれが、日常、耳を通していかに豊かな情報を受けとっているか。たしかに、吹く風の音に自然のうつろいを感じたりする風流以外に、われわれはいろんな人の声色を聞き分けたり、通

り過ぎる街の賑わいから世の中のさまざまな気配を感じ取ったり、機械やエンジンの回転音からその調子の善し悪しを判断したりしている。

目から得られる情報に話を変えると、画像は活字よりは情報量が多いといわれるが、文部省放送教育開発センターの大橋力教授によれば、高品位といわれるハイビジョンですら、撮影された情報が大幅に間引いてあるそうである。周波数帯域に制限があるので、人に気づかれずに感性の裏をかく情報の帯域圧縮の技が競われているという。教授は「このように未熟なメディアが送り出す情報は、質量ともに貧弱すぎる。とくに、脳に優しい、稠密(ちゅうみつ)膨大な自然環境情報を、その反対の記号性の情報に置き換えた負の遺産は重い。希薄化した情報環境の中で、人類の卓越した情報受容能力は空振りし続けている。つまり、現在の生活空間は情報過度どころか異常な情報欠乏状態にある」と、ある新聞紙上で書いておられる。自動化コックピットのなかでパイロットたちが状況認識を失いがちで、自動化システムでいま何が起こっているかがわからずに混乱するのは、このためであろう。

今日のコックピットの中は記号化された情報でいっぱいであるにもかかわらず、パイロットは、かつての先輩たちが視覚や聴覚やパンツの底の触覚によって、外界と乗機から得ていた豊かで高密度の情報よりも遥かに少ない情報しか得ていない。コックピット内はむしろ「貧アフォーダンス環境」なのである。自動化されたコックピットのなかでは情報が多すぎるからといって、

警報などの表示の数をできるだけ制限しようとするサイレント・コックピットという設計思想があるが、そのような考えが出てきたのは、消化しにくい理解に苦しむような記号情報がやたら多いため、メンタルな負担が増えたからである。われわれの生活環境のなかにあるような脳にやさしい情報なら、パイロットはもっと多くの量を取り込み、苦もなく利用できるはずである。著者はこのアフォーダンスは、従来からパイロットに要求されてきたエアマンシップの重要な要素であると考えている。

しかし、パイロットはとにかくこのような貧情報環境のなかでも、安全性の高い運航を確保している。それはどうしてであろうか。著者にはそれもまた、人間の脳のすぐれた働きによるとしか考えられない。

著名な神経生理学者ローゼンフィールドは著書『記憶とは何か』（菅原勇、平田明隆訳、講談社刊）のなかで、「ひとの脳はコンピュータのメモリと違って過去の記憶を丸ごと固定してストアするのではなく、それをセグメント（断片）に分割し、それをカテゴリー化（分類）して多数のニューロンに分散ストアする。感覚刺激があると大脳周辺系が活性化し感情（情動）が作り出される。感情が活発になると、漠然としていた記憶の断片が状況に応じて一つの統一性ある全体となってつながる。こうして再生された記憶は新しい環境に適合したもので、もとの記憶そのままではない。……記憶が記憶たり得るのは、現在という前後関係においてのみ可能である。私た

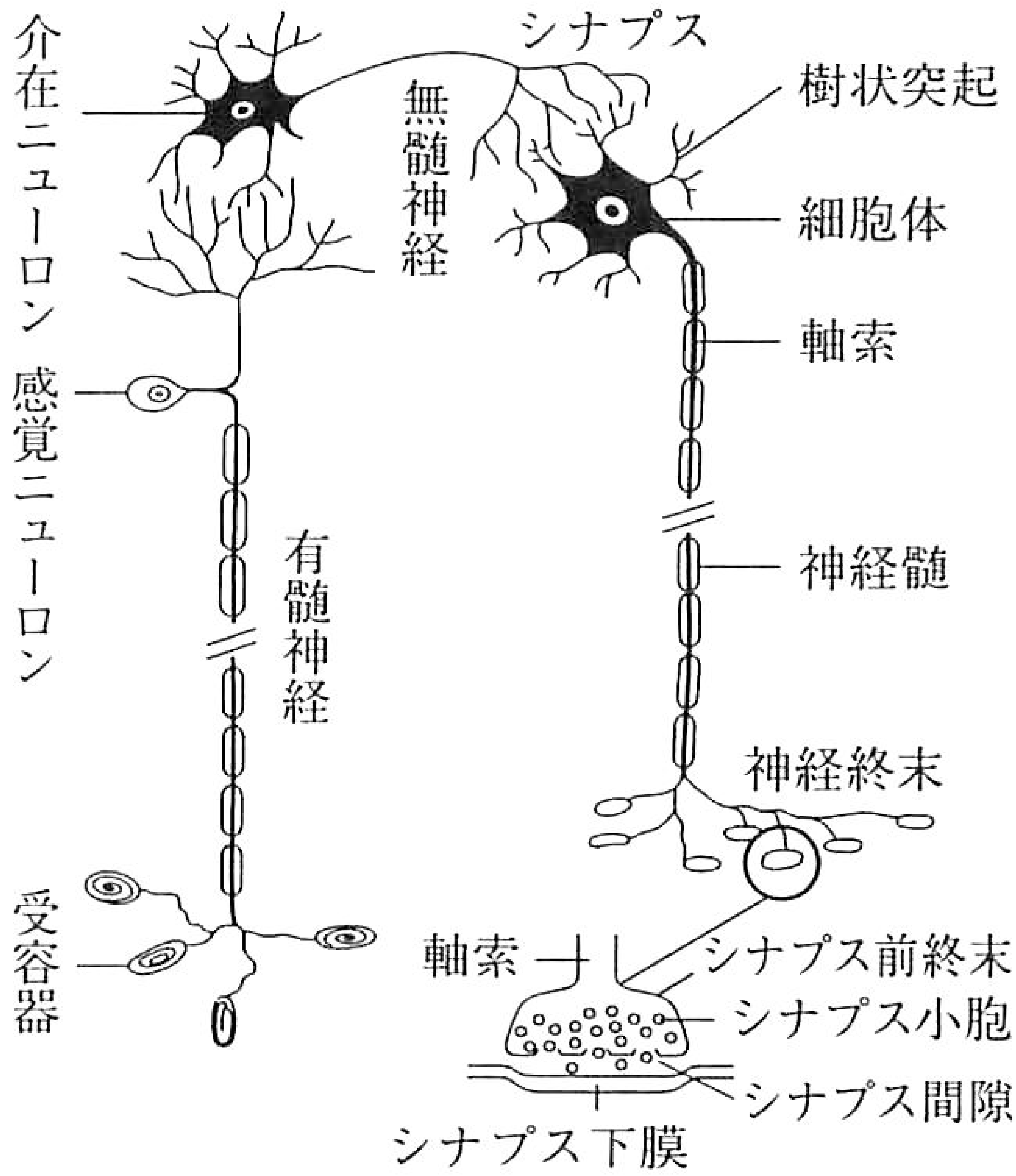


図3-1　脳の神経細胞ニューロン（ブルーバックス　神川喜代男『脳を作り上げた生物の不思議』P90）

ちは思い出すことを、現在、この場で構成するのである」という主旨のことを述べている。

ひとの脳では視覚情報が電気的刺激として順次、網膜→視神経→大脳皮質と流れるとき、それが通過したことが特別なニューロン（神経細胞）の組合せ間の結合を強め、この結合パターンとしてデータのストアが起こるが、その際、多くのパターンがオーバラップして一緒にストアされる。そのため、たった一つの感覚刺激が加えられただけでも、洪水のような記憶を呼び起こすことができるという（図3―1）。この働きはコンピュータでは模擬できない。

このことから考えると、以前、パイロットは五感を総動員して自然界から豊かな情報を摂取し、操縦桿とペダルを四肢で動かし、それから得られる運動感覚で活性化された脳の働きによって豊かな過去の記憶の断片を統合して、現実の環境に応じた記憶を再構成するという、ダイナミ

ックな認識活動を行ってきた。この柔軟な脳の働きが、手足の動きが少ない、感覚刺激の乏しい、記号化された貧情報環境のなかでも、辛うじて状況認識を維持することを可能にしているのである。このことを理解しないで、パイロットを自動化のなかの弱いリンクと思い違いをすると、コックピットから人間的要素をできるだけ排除しようとする行き過ぎた自動化に走ることになる。航空機においては、機械が人間から自立できると考えるのは、大きな誤りである。

暗黙知はプログラムできない

新世代機ではコンピュータはパイロットの仕事を引き継いではいるが、人間の機能を全部代行しているのではない。では引き継がれていない人間の機能とはなにか。

人間は語れる以上に、より多くのことを知ることができるという。つまり、われわれは明言できない知識である「暗黙知」を持っているのだ。例えば、幼児でも自転車を乗りこなすことができるが、その乗り方を論理的にくわしく説明できない。「ハンドルやペダルの感覚」という具体的な項目から、人間はイマジネーションによって「自転車を先に進める」という包括的全体を予測し、ハンドルやペダルを微調節するのである。イマジネーションとは「先行して見立てを行う能力」、あるいは「結末を予測する能力」のことである。

パイロットも操縦に関して膨大な量の、語ることができない暗黙知をもっているが、それは語

ることができない以上、プログラム化することはできない。したがって、この種の操縦能力は自動化機械によって代行することはできないのだ。パイロットが過去半世紀の間に蓄積したこの貴重な知識と能力は、自動化の過程でやむを得ず切り捨てられる。自動操縦システムは、データベースのなかにいかに高等な飛行理論を記憶していようが、操縦技量としてみると極めて低いレベルから出発していると言わざるを得ない。

例えば、失速プロテクションを考えてみよう。昔のパイロットなら、失速の初期であればそこから脱出するすべを心得ていた。この失速からの脱出操作を理論的にプログラムすることはできないから、自動操縦では機体のピッチ角を制御則が通用する範囲内に厳重に制限することによって、このパイロットの回復操作を不要にしようとしたのである。しかし、実際にはエアバスの生みの親のジーグラーが嘆いたように、プロテクションには往々にして穴があり、そこに落ち込んでしまうと自動化システムは手の施しようがない。だから、高度のスキルを持つパイロットが自動操縦の動きにもどかしさを感じるのである。ボーイングの設計思想は、この失速限界付近ではパイロットの判断による操縦に任せている。ボーイングは一歩間違えば危険に陥る限界領域での安全確保こそ、パイロットの技能に期待しているのである。

この操縦技量がプログラムできないとなると、それは教育訓練によってパイロットからパイロットに直接引き継ぐしかない。今でも、パイロットは運航において予期しない事態やシステムの

故障が起こったとき、手動操縦でそれに対処するためのベーシック・スキル（基本的技能）を身につけることを求められているが、そのような技術の継承は実際行われているであろうか。自動化の利点を追求しようとする航空機メーカとエアラインは、自動操縦方式の新機種へ移行するときの混乱を防ぐため、移行訓練では古い感覚をいったん忘れ去ることを要求し、できるだけ自動操縦を使うことを勧める傾向がある。そのため、底辺にいるパイロットのスキルは、最近低下する一方である。この人たちが悪化した事態を改善しようとするとき、自らの能力にではなく自動操縦に頼る傾向を生んでいるのは、当然の成り行きである。

このように、航空機の自動化は、航空界の貴重な財産であるパイロットの操縦スキルを引き継ぎ発展させるのではなく、新しい拠点からスタートした。その拠点とは、多くの航空技術と情報工学の成果を盛り込んだソフトウエアである。これは重大な技術の変革である。そのうえ、この変革はコンピュータのブラックボックスのなかで秘かに進行し、運航段階になってはじめてその実体が知られるに至ったというのが実情であろう。コンピュータが操縦すると聞くと、何か超能力を備えたものが操縦すると素朴に考える人もいるかも知れないが、コンピュータを動かすソフトウエアは人間の頭脳労働の産物であるから、当然ヒューマンファクターズの影響を免れない。

前にも述べた『ソフトウエアの法則』の三一条「誰もが思っているのに決して口にしない法則」に、「コンピュータのプログラムなどというものは信頼できない。それを作ったプログラマ

はなおさら信頼できない」というのがある。これは謙虚なプログラマ自身の告白である。プログラマも人間であるから、間違いをするだろう。プログラマにとっては、それは気付いたときに修正すればよいことである。しかし、パイロットは操作を誤った場合、それに気付いたとしても手遅れのことが多い。木下は「プログラマは、常に最悪の事態を予測する資質が必要である」と言っているが、ソフトウエアの制作は運航の現場で起こる事態を十分理解して行われているのであろうか。

一九九七年にドイツのエアラインのパイロットを組織する団体であるフェライニグング・コックピット（仮に「コックピット連合」と訳す）が傘下の五〇〇人以上のパイロットに対して行ったアンケート調査によれば、半数以上のパイロットは、最新型のいわゆるグラスコックピット装備の航空機についての自分たちの知識水準は不十分である、と回答している。この反応は年齢に関係がなく、若いパイロットもグラスコックピット内での自動化された機械との複雑な相互関係について、懸念を表明した。

この調査結果のなかで注目すべきは、六三パーセントのパイロットが技術文書の明解さについて否定的な意見を持っていることである。中華航空機の事故（第二章参照）の項でも例示したように、現在のマニュアル類はシステムエンジニアのロジックをそのまま記述したものである。これをパイロットに与えることは、法律の専門家でない者に六法全書を読ませるようなものであ

る。自動化されたシステム全体の仕組みが頭に入っていないとき、いわゆる自動化のメンタル・モデルが形成されていないときに、個々の項目を教えてもそれは役に立つ知識体系としてパイロットのメモリに蓄積されない。したがって、自動化システムが、いま何のために何をしているかが理解できないから、トラブルに適切に対処できない。

コンピュータの聖域

著者は航空技術の研究者として一九六〇年代のＮＥＡＣやバロウズ、ＤＥＣのコンピュータから始めて、その後のＦＡＣＯＭなど各世代のコンピュータを使い、プログラム作りの難しさに泣かされた経験から、コンピュータが今のように普及したのは、プロのプログラマがさまざまなアプリケーション・ソフトを開発し、それが妥当な価格で市販されるようになり、ユーザがプログラム作りの苦役から解放されたお陰だと考えている。同じように考えて、現代のハイテク航空機の場合は、多数の技術者の努力がコンピュータ・ソフトの形に結実し、それが「人間パイロット」の能力を超える信頼性の高い運航を可能にするかも知れないという期待があった。

ところが、マルチメディアやバーチャル・リアリティについて鋭い洞察を発表している東京大学の社会科学研究所の西垣教授が指摘したことが現実になり始めている。それは「コンピュータがもっぱら数値計算機械として用いられていた頃、その出力は無誤謬だと考えられていた。だ

が、高度なトレーニングを積んだ専門技術者だけがコンピュータをあやつり、間違いない出力結果をもたらすという文化が確立したことによって、異様なものができあがってしまった。コンピュータのつくる『等質な聖域』である。人々はそれを侵すべからざるものとして信仰するようになった。具合が悪いのは、それが近代の『生産効率合理化至上主義』の象徴となってしまった」ことである。航空ではこのような「聖域」の存在は、安全にとって、また事故原因の解明にとっても大きな障害になる。

ユーザプログラミング

『ラジカルなコンピュータ』（ジャストシステム刊）の著者の岩谷宏氏は、コンピュータによるコミュニケーションの可能性を高く評価しているが、プロが作ったソフトには批判的で、「コンピュータ利用技術のプロという人種の存在がなぜおかしいか、なぜまずいのか。そのことを端的に象徴しているのが名古屋空港での中華航空機の墜落事故である。……航空機の操縦系統を利用するのは操縦士だ。にもかかわらず、操縦系のコンピュータ・システムを設計し実装するのは、その肝心の利用者ではなく、また航空機やその操縦のプロではなくて、たかだかコンピュータのプロだ。……飛行機のことも操縦のこともよく知らないおじさんが、飛行機の自動操縦のプログラムを書いている。……コンピュータ化の動機と実施主体が真の利用者にあれば、仮に開発には

依然として『プロ』が主導的に関与するとしても、飛行機を知らない人がプログラムを作ることに伴う危険はある程度和らぐ」と説き、各人がコンピュータ言語を使ってプログラムを作ってコミュニケーションすることを提唱している。

確かに、コンピュータ・コントロールで飛んでいる飛行機の操縦の仕方は、そのソフトウエアを書いたシステムエンジニアが考えたものである。その考えとはいかなるものか。すでに何度か触れた「アルファ・フロア」を例にとろう。これは突風で翼が下から煽(あお)られたとき迎角が約一五度を超えると、航空機を上昇させるためエンジンの推力が自動的に増す。このようにして加速して上昇することによって、失速して墜落するのを防ぐのがアルファ・プロテクションである。ところが、エンジンが翼の下面に付いている機種ではエンジンの推力が増すと機首が上がるから、上昇が早く起こらないとかえって失速を促進する。

つい最近、あるエアラインが起こした異常運航が話題になった。空港に着陸しようとしてエンジン推力を絞って降下中に風のためこのプロテクションが始動して、突然エンジン推力が増したため機首が上がり失速した。幸い高度が十分だったから失速から回復することができ、無事着陸した。

著者の知人の大井機長は、そのようなときバンクして失速を回避するとよい、と教えてくれた(図3―2)。確かに、高いピッチ姿勢で大きくバンクすれば垂直尾翼は下がって風によって吹き

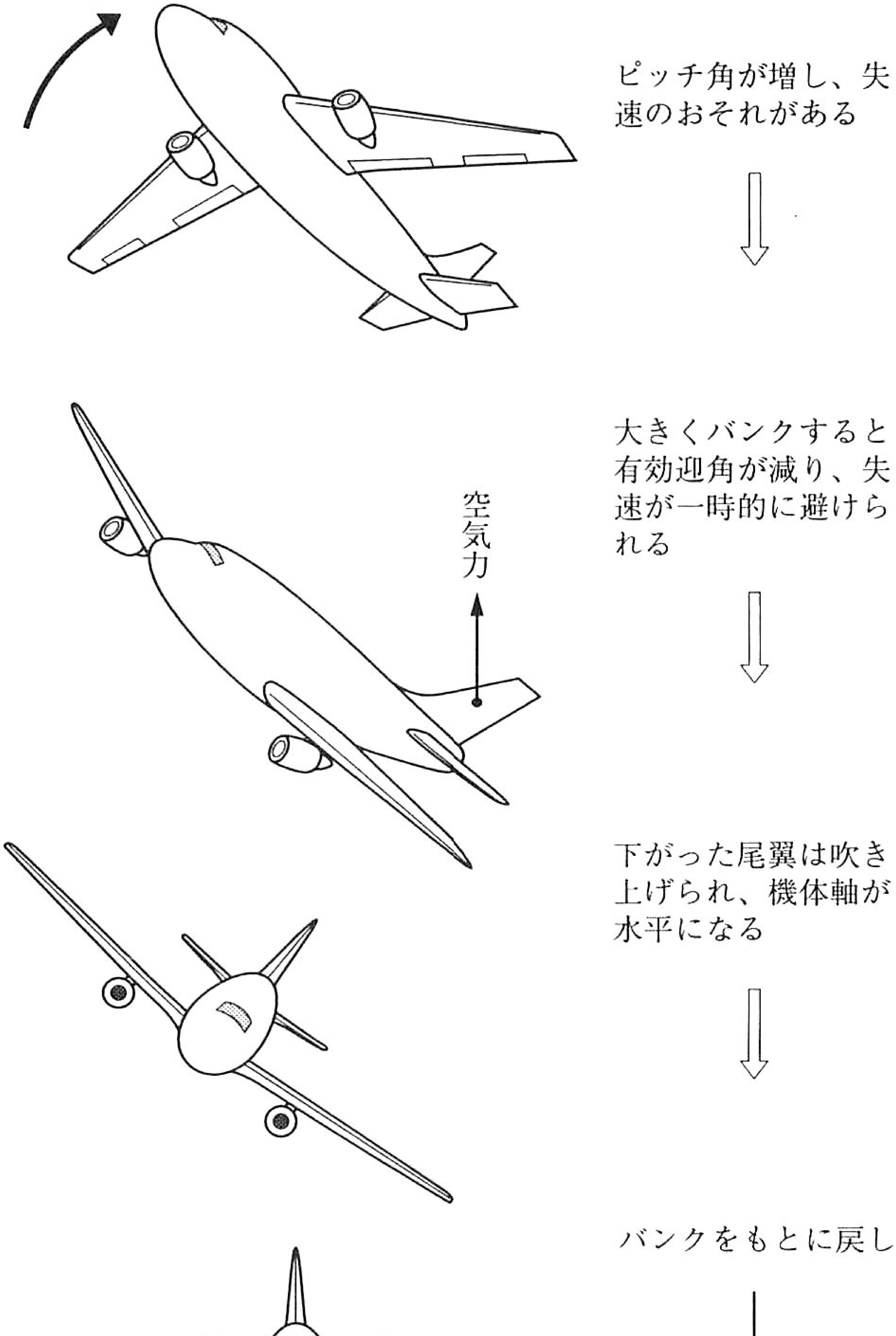


図 3-2　大きなピッチ角でのバンク（失速回避）

上げられる姿勢になり、それには機首を下げるような空気力が働く。機首が下がって機体軸が水平になったら翼を水平に戻せばよい。大井機長は少年時代からやっているラジコンからこの操縦法を思いついたというが、飛行力学的に見ても、理にかなった方法である。前述のユナイテッド航空の高級操縦訓練パッケージ（ＡＭＰ）にも、この方法が採用されている。やみくもに推力を上げるばかりが能ではない。

　このようなパイロットの知恵をプログラムすればよいわけであるが、航空機のコンピュータ化は、前にも述べたように過去の蓄積とは無縁な拠点からスタートした。吉永は前述の『「複雑系」とは何か』のなかで、「現在のコンピュータは、指示されたことなら、どんなに厄介な仕事でも正確にこなしてくれる。しかし、やれるのはそれだけである。融通性や独創性といったものはまるでない。文字通り、石頭（シリコン）である。……人工知能も人間に近い判断のできるコンピュータの実現を目指しはした。だが、そこではすべてを人間の手でプログラミングすることが暗黙の前提になっていた。そんなことは不可能であることを教えてくれたのが複雑系の科学である」と述べている。また、金子邦彦氏の「欧米の研究で感じるのは、複雑にみえる現象をできるだけ単純に理解しようという傾向である。そのためにはむろん多くの部分をエイヤッと捨象しなければならない」（数理科学、一九九一・六）という意見を引用しながら、「本質的な問題点は、要素的な部分を独立させることが可能であるという見方と、部分の重ね合わせから全体が出てくるという見方

にある。（中略）どこかに信頼できる原理なり法則なりがあり、それを理想化することでノイズを除いた重要な部分だけを取り出し、そこから近似的なモデルを構築できると信じられてきたのだ」と論じている。

ヨーロッパで行われている自動飛行制御にも、同じような思想傾向がみられる。人間の関与はノイズなのだ。それはエラーのもとであるから、自動化によってこれを除去しようとする。

これに対し金子氏は、複雑さをもった基本プロセスから組み立ててモデルを構成しようとする構成論的アプローチを提唱する。それによれば、仮想的な歴史と現実の歴史を見比べることで、生命の起源のような大問題に肉薄できるかも知れないという。登場人物が物語の空間の中で自律的な振る舞いを創発する。「物語というのも、複雑系研究の方法として人類が生み出した最高の方法ではないだろうか」

パイロット教育で行われている路線運航に向けた飛行訓練（LOFT：Line-Oriented Flight Training）は、著者にはこのアプローチの一つにみえる。これはシミュレータ・ベースの訓練の一つで、実際に定期航空の路線を飛んだときに遭遇する気象の変動、エンジン火災、その他の航空機システムの異常などのイベントをシナリオにして、シミュレータのコックピットのなかで二人のパイロットが協力し合いながらその状況の処理法を「創発」させるものである。教官側は環境条件を設定するだけで、あとはパイロットの振る舞いとその結末を追う。物語から操縦の問

題点を見つけ出させる。この教育法がヨーロッパではなく、実践を貴ぶ米国で芽生えたことは意味が深い。

第三のコックピット・クルー

一九八〇年代後半にハイテク機が定期運航に導入され、コックピット・クルーがそれまでの三人から二人に減らされたとき、その是非をめぐって世界の航空界でやかましく議論された。しかし、著者からみると、コックピットの中にはやはり三人のクルーがいる。二人は、いうまでもなく人間パイロットであるが、三人目は操縦ロボット、つまりコンピュータ化された飛行制御システムである。

この操縦ロボットの頭脳はソフトウエアであるが、開発の過程でそのソフトウエアのなかに多数の技術者のヒューマンファクターズが入り込み、それがコックピットに持ち込まれて新しい不安全要因になった。人間パイロットならば長年の教育訓練を受け、厳しい資格審査をパスしなければならないが、この第三のコックピット・クルーは適切な訓練を受け、その資格が十分審査されているようにも思えない。

ソフトに潜在する欠陥だけが問題なのではない。操縦ロボットとパイロットの間のコミュニケーション・ギャップも、新しい問題を持ち込んだ。航空医学の権威で早稲田大学の黒田勲教授

は、自動操縦システムの特徴を次のように表現した。
(一) コントロールを乗っ取る権力を持つ
(二) 何が起こっているか、いっさい語らない
(三) 手遅れになっても告げない
(四) 自ら死ぬことをいとわない

これではパイロットでなくても、付き合いたくない相手である。コックピットにこの姿のない代理人を送り込んできたコンピュータ技術者たちに、パイロットと同じ緊張感を期待することは困難である。しかし飛ぶことをしない彼らが自分の考えを押し付けるのではなく、実際のコックピットのなかの日常的な、あるいは緊迫した状況で、自分たちの開発した技術をパイロットたちが有効に使うことができるかどうかについて真剣に考えることは、航空安全にとっては重大問題である。

問題の根底には、自身で飛んでいないシステム・エンジニアの認識の枠は、パイロットの認識の枠と重なり合わないという、いわゆるフレーム問題がある。米国のラングレイ教授はライト兄弟よりも数ヵ月前にエロドロームという動力式飛行機をポトマック川で飛ばそうとしたが、失敗した。教授は自分では飛ぼうとせず助手のマンリーに操縦させたが、この助手は墜落して怪我をした。地域航空総合研究所の宮田顧問はラングレイとライト兄弟を比較して、「作り手が墜落す

る痛さを知っているかいないか、この一点がまるで違う。ボーイングも飛行機を作ろうとしたとき、まず最初にしたことは操縦を習うことだった。……コンピュータは作り手に絶対の忠誠を誓うマシーンである。コックピットから人が消えることは、『墜落しない立場』が『墜落する立場』を蚕食(さんしょく)して『飛ぶ』ことを成立させる。このパラドックスが危ない」とある雑誌に書いている。

このようにして自動化されたコックピットのなかには、墜落する立場のパイロットの持つヒューマンファクターズに加えて、大量のコンピュータ・ソフトに内蔵される、墜落しない立場の人たちの異質のヒューマンファクターズが入り込んだ。「自動化コックピット」という、いかにも人間臭さとは無縁に思われる言葉から想像されるものと、これほどかけ離れた図はあるまい。

前述の西垣教授は「肉体を伴わない空間の中ではどんな嘘でもつけるし、異質な意見を抹殺する電脳独裁者が勢力をふるうグループも生まれるだろう」と危惧している（『思考機械』筑摩書房刊）。これまで世界の航空界は運航全般に対して厳しい審査制度を確立し、資質を欠くエアラインとパイロットを排除し、さらに厳選されたエアラインとパイロットについても、技量と安全基準の維持について入念な定期的な査察を実施してきた。このチェックシステムが今日まで航空輸送の高い安全性を支えてきた。しかし、第三の電脳パイロットがチェック体制が整わぬまま、十分な資格審査を経ずにコックピットに入り込んで来たことによって、この審査制度は破綻しようとしている。西垣教授が恐れているようなことがコックピットのなかで起こり得るとすれば、

この危険性のある技術を航空界は安易に受け入れてよいものであろうか。コンピュータとともにコックピットに入り込む電脳独裁者を排除するために、これまでパイロットに対してとられたと同じ厳正な手段が講じられなければなるまい。

巨大化し、ひとり歩きするソフトウエア

パイロットの操作はコントロールの最上層の階層に属し、記号化された論理操作である。最も低い階層にはエレベータ、エルロン、ラダー、スポイラ、スタビライザなどの操縦面と、それを駆動する膨大な数のアクチュエータがある。パイロットは下の階層については何も知らなくてもよいというのが、自動操縦の根底にある「アマチュアリズム」の概念である。もちろん、パイロットはコントロール・ソフトの中身の飛行力学や、制御理論、個々の機器の機能原理を知らなくてもよく、速度や上昇角などの数値をパネル上のダイアルによって設定し、押しボタンを押したあとは、自動操縦システムがその命令を実行するのを見守るだけでよい。ここでパイロットが行っているのがアマチュアリズムである。

このように制御システムが階層化すれば、それと表裏一体であるソフトウエアも階層構造になる。そのソフトウエアの開発作業も階層化している。上位の階層のプログラマは、何百人という下位の階層のプログラマが作ったサブ・プログラムを土台にして作業する。したがって、彼は各

機器の動きを具体的にコントロールする方法については知る必要がない。ここでもアマチュアリズムが働いている。システム設計の階層化の結果、誰もがシステム全体を見通すことができなくなった。これでは、形式的にではなく実質的に、全体の責任を負うことなどできない。

米軍が開発中のＦ22のような戦闘機でも、コントロール用ソフトは一六〇万行になる。また、ハネウェル社が開発したボーイングＢ７７７型機用の「ソフトウエアＶＩＡ二〇〇〇」は、それをはるかに上回る五〇〇万行という膨大なものだが、これを四〇社以上のソフト・メーカが違った場所で同時に平行して開発している。もちろん主流になるプログラムがあり、各社のプログラマはそれに準じて作業するのであるが、問題なのは、プログラマには誰にもいわずにプログラムを変えようとする誘惑に屈する傾向があることだという。

またソフトウエアの開発段階でバグ（虫）が紛れ込んで、運用に入ってから暴れ出す可能性がある。そうなっては手おくれだから、開発段階でのチェックが必要である。しかし、離ればなれの場所で同時進行する大勢のプログラマの頭脳労働を統制するのは人間業ではない。そこで登場するのが、やはりコンピュータである。「プロセス・コンフィグレーション・マネージメント・ソフトウエア（ＰＣＭＳ）」というソフトを使って、センター・コンピュータが各作業所を結ぶ通信回線によって、プログラマたちが作ったソフトがお互いに衝突しないように監視する。このシステムではコンピュータの許可なしに勝手に変更することは許されない。

いまではソフトの開発を管理する時代になったのである。

プログラムの製作がこのような責任分散状態だから、誰かがたまたまプログラム・ミスを見つけたとしても、修正を提案し実行するには大変な勇気を必要とする。そのいい例は、大きな問題になっているコンピュータの「西暦二〇〇〇年問題」である。一般に年号は西暦の下二桁でコンピュータに入力しているので、二〇〇〇年を超すと一九〇〇年代のものと区別がつかなくなる。この問題はかなり前から関係者の間では認識されていたのだそうである。しかし、プログラムの手直しには数億円の費用がかかり、その投資は利益にはつながらない後ろ向きの経費であるから、提案するのをためらった。また担当者も交代を重ねて何代目かになってしまって、責任の所在がはっきりしなくなったことなどから、今日まで放置されたという。

このような弊害は大規模ソフトに共通する問題であるらしい。たとえプログラム・ミスが見つかったとしても、それが滅多に使われないロジックに入っている場合、放置されてもわからない。機体構造やエンジンの欠陥なら徐々に進展するから、適時に点検すれば事故になる前に発見される可能性があるが、それと違って、ソフトウエアの欠陥は事故が起こって初めてその存在が明らかになることである。それまでは、言い過ぎかも知れないが、誰が作ったのかわからない、虫食いソフトウエアが動き回っているのである。

とくに一九九六年六月四日に起こったフランスのアリアン5型ロケットの打ち上げの失敗は、

ソフトウエアに潜むヒューマンファクターズの深刻さを教えてくれる。このロケットは打ち上げ信頼性八九・五パーセントを誇っていたアリアン4型の後継機で、一基九〇〇〇億円という高価なものだ。地球を回る低軌道に一〇トンの有償荷重を打ち上げることのできる、世界最大級のブースタ・ロケットである（図3―3）。これが打ち上げの三〇秒後、急に姿勢制御用コンピュータが停止して大きく傾き、その角度のずれが二〇度になったとき、自爆装置が作動して破壊されてしまった。原因はソフトウエアにあった。

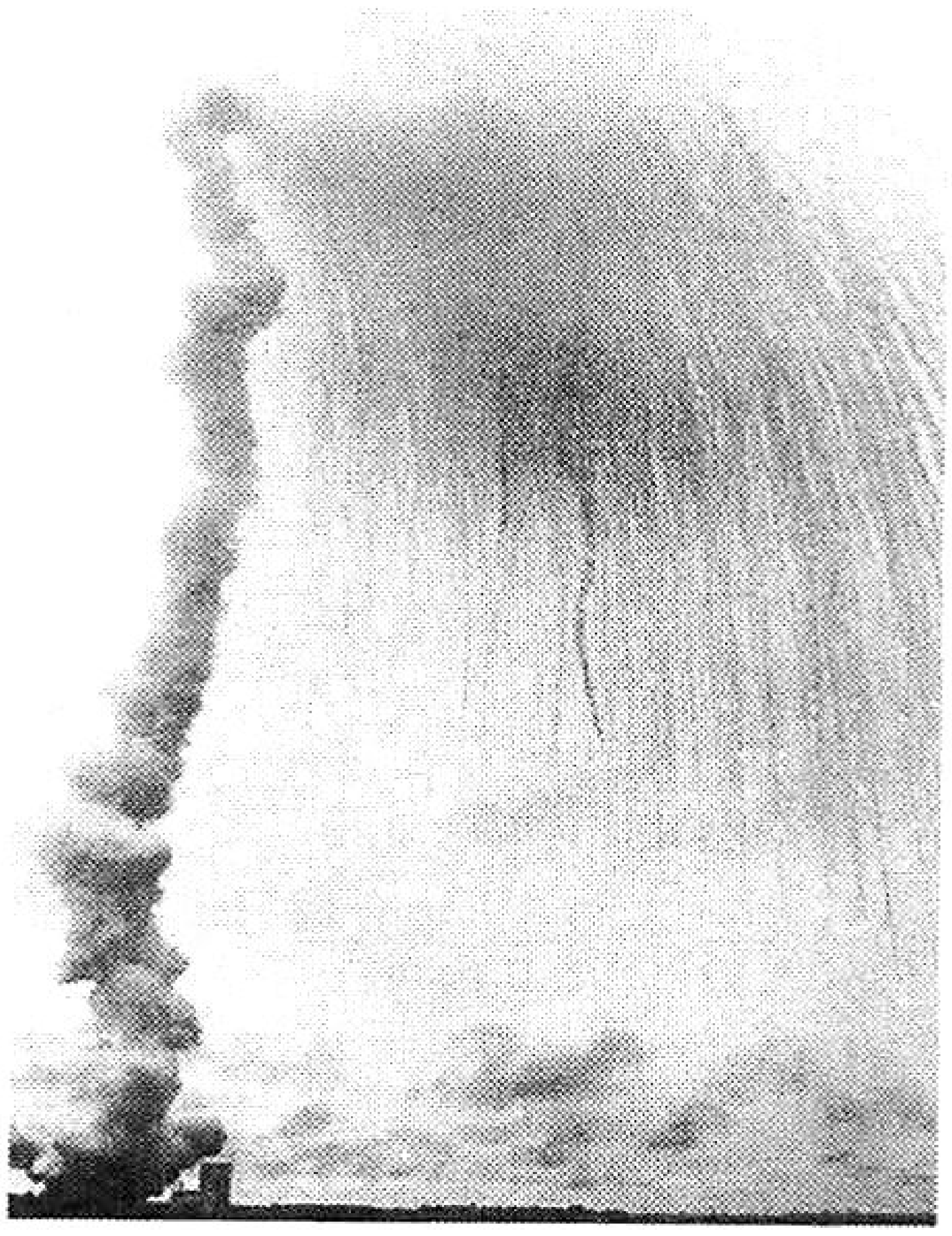


図 3–3　アリアン 5 型ロケットの爆破（AFP＝JIJI）

このロケットは地上のランチャーに乗っているときは、軸の移動を常時検出してコンピュータに入力し、軸位置をコントロールする慣性基準システム（ＩＲＳ）が働いている。打ち上げたあと空中では別のＩＲＳコンピュータが飛行姿勢をコントロールするが、この地上でしか用のない軸合わせ用のコンピュータも切れずに計算を続ける。なぜこれを切る設計になっていなかったかはわからない。垂直に近く打ち上げられたあとロケットの姿勢はだんだん横に寝ていく。その姿勢角を検出した地上用のＩＲＳコンピュータは、この角度変化を誤差とみなして蓄積していっ

た。この誤差は際限なく蓄積され、三〇秒後にはオーバーフローしてしまった。その数値の桁数がコンピュータが取り扱うことのできる限度を超えたのである。

ところがこれまた不合理なことに、この飛行には必要ないコンピュータがオーバーフローすると飛行姿勢制御用のＩＲＳコンピュータまで止まってしまう設計になっていた。ロケットは制御不能に陥った。

このソフトウエアは前のアリアン４型のものをそのまま使用した。４型の打ち上げ後の姿勢角変化は小さかったのでコンピュータのオーバーフローは起きなかった。アリアン５型では打ち上げ後のロケットの姿勢角の変化が４型より大きかったにもかかわらず、シミュレータ試験による検討も行わなかった。その裏には開発費用が予定を大幅に超過したため、資金面で苦しくなったという事情もあったようであるが、４型で成功していた同じソフトウエアを使うことに何の懸念も感じていなかったというのが、本当らしい。

このように、ソフトウエアのミスは、その被害の対象が、国家の威信を賭け、何千億円の費用をかけて開発したロケットであろうとお構いなしに発生する。それがヒューマンファクターズの本質である。ソフトウエアの欠陥が人命に関わる事故を起こすおそれのある旅客機で、このようなことが許されるであろうか。

英国の民間航空局のアビオニックス設計部のホークス部長は、飛行安全財団ＦＳＦが発行した

報告書のなかで、「ある人はソフトウエアが故障したというだろうが、これはありえない。配線のミスが故障でないのと一緒だ。私はコンピュータ業界にある『ソフトウエアの保守』という奇妙な概念を認めない。もし間違っていたら改修しなければならない」と言っている。虫があることがわかったら、そのソフトがそのまま「保守」されることは許されないというのである。

開かれたソフトウエアの試み

機体を設計するときは設計計算、風洞試験、コンピュータ・シミュレーションなどによって得られたデータから、ユーザは事前にその性能を確認できる。これに対して、運用側がソフトウエアの信頼性を事前に確認しようとしてもそれは不可能に近く、営業運航に入って異常運航や事故が起こって初めて問題点を知るようになる。これはソフトウエアの最後の仕上げを運航現場でやっていることになるが、事故が起こってからでは手遅れである。

前述した岩谷氏は近著『パソコンを疑う』（講談社現代新書）のなかで、「プログラムは、自分の目的に合い、自分がよく理解でき納得できるアルゴリズムと実装形式で自分が作れることが重要であるとともに、本来自分とものの考え方のパターンなどが根本的に異なる他人の作ったプログラムを、十分に理解して使うことが必要である」とする立場から、プログラムがユーザにとってまともで健全であるための条件として、

（一）ユーザプログラミング
（二）情報の開示
（三）プログラム～プログラミングをめぐるコミュニケーション

の三つを挙げている。この考えは、本書でこれまで述べてきたことから見て、航空機でも必須の条件である。

ボーイングはB777の開発に当って、設計段階からエアラインの意見を取り入れる「Working Together」方式を採用した。しかし、その範囲はコックピット内の操作機器や表示にとどまっているようである。操縦ソフトに関してはこの共同作業が行われるためには、岩谷氏の挙げた（二）と（三）が必須の条件であるが、それが行われた話は聞かない。

ただし、B777のソフトウエアが全くのブラックボックスになっているわけでもなさそうである。ハネウェル社が開発したボーイングB777用の「ソフトウエアVIA二〇〇〇」は、五〇〇万行という膨大な規模のものだが、それには間仕切りがしてあり、ソフトウエアの一部に変更を加えても、その他のシステムの機能は干渉を受けないよう保護されている。このツールによって、ユーザは「エアラインが修正可能な情報」と呼ばれるファイルを変えることができるという。

一方、「オープンなソフト・システム」という概念を唱える人もある。前述の英国民間航空局

のホークス部長は、「将来の航空機では、ソフトウエアについてはオープンなシステムになるかもしれない。すなわち、システムが分散構造になっていて、各機能ごとに標準化されたインターフェースがあり、必要な操作機能用のソフト・パッケージをロードする」と述べている。その際、そのソフトの命令で機能するハードウエア（機械装置）のことは考えなくてもよい。この傾向は機能用のソフトを選択する自由がより幅広くなる利点がある。また、ユーザがソフトウエアの一部を自社の運用に適するように改造することも不可能ではなくなる。

しかし、このようなソフトウエアが作られたとしても、その使用が法規上認められるかどうかは別問題である。ホークス部長によれば、「ソフトウエアは独立した製品として証明が受けられるのではなく、それが使われるアビオニックス機器の一部品として取り扱われる」。要するに、そのソフトで動く機器が正常に作動すればよい。したがって、ソフトの問題は機体あるいは機器メーカの責任であるから、たとえ能力があったとしてもユーザだけで改造することは許されない法制になっている。

このように、操縦ソフトがブラックボックスになっていて手を触れられず、実地の運航から得られる経験や、パイロットの側からの要求が受け入れられないといった状況は、今後改善の余地がある。そしてこれは乗客乗員の生命に関わることであるから、ぜひとも岩谷氏のパソコンよりも先に行うべきである。

パイロットは最後の砦か

航空技術がいかに進歩しようとも、その技術の限界を超えた先にさらに人間の果たすべき役割があるというのが、従来の考え方である。これはパイロットに機械力を超えた人間的能力を発揮することを期待するもので、「パイロットは安全の最後の砦」という言葉で端的に表現される。

この考え方の難点は、高度に機械化された航空機の運航ではパイロットがこの能力を錬磨する機会がきわめて少なく、緊急時に役立つほどのレベルにそれを維持することが難しくなったことである。

今日では、パイロットの役割についてこれと異なる考え方が現れている。それは、最高の技術を駆使して作られた自動操縦システムをパイロットが十分に使いこなして、それによって達成された限界を、人間のなし得ることの限界とする考え方である。これは、パイロットのすぐれた能力といえども、機械のもつ高い信頼性の限界を超えては、もはや機能しないという認識からくる。第二章の「モード」の項で説明した「自動操縦モードの逆戻り」は、パイロットの指令が制御ロジックから逸脱したとき、例えば離陸滑走中にパイロットが推力を絞ろうとしてもできないように、コンピュータが歯止めをかけているのである。

では航空機の機械システムの信頼性はどれほどのものなのであろうか。これをエアバスA32

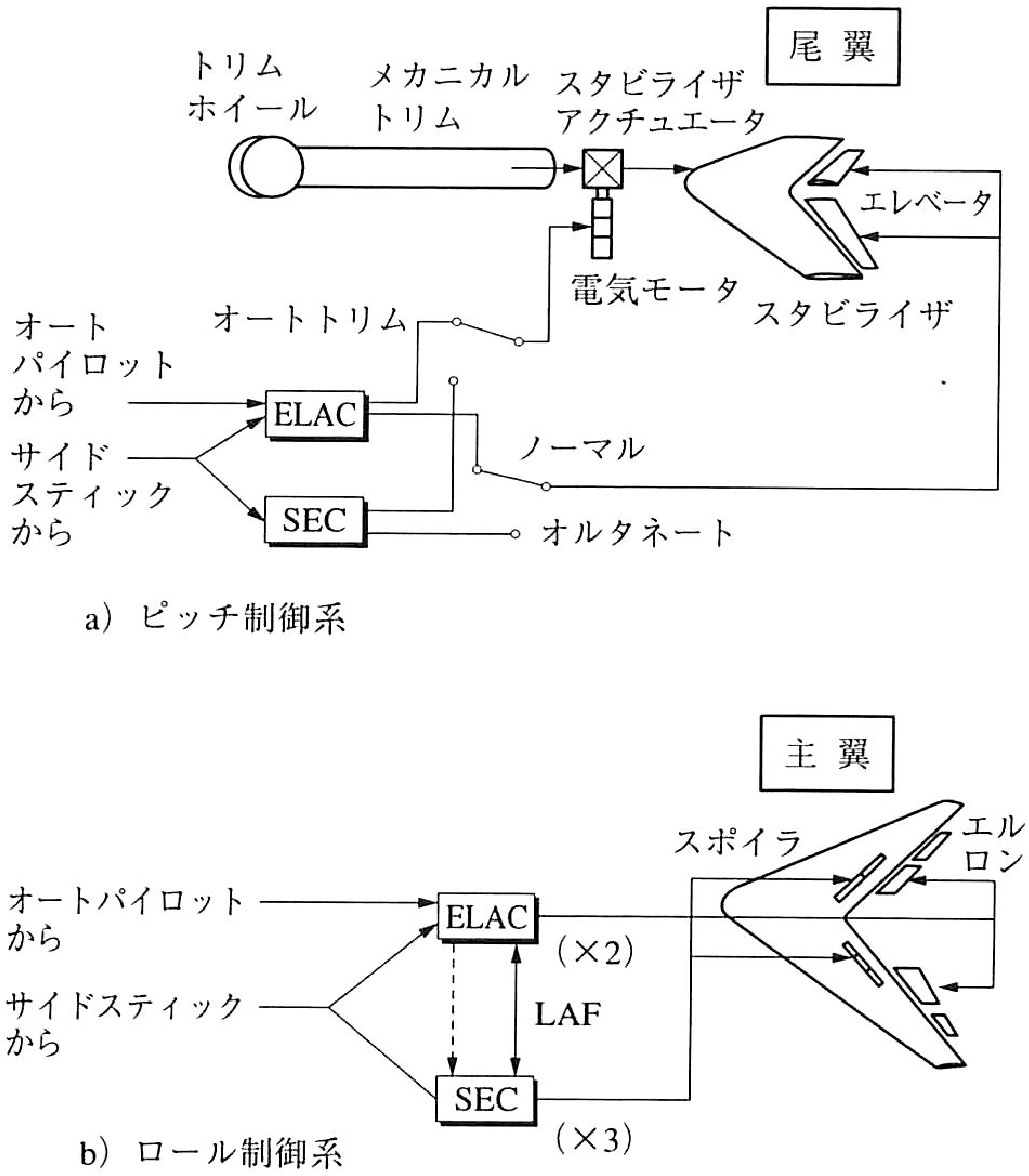


図 3–4　A 320 の操縦システム

０の機械式バックアップを例にして説明しよう。Ａ３２０の操縦系統のコンピュータはＥＬＡＣ二重系、ＳＥＣ三重系、ＦＡＣ二重系の、合計七つのコンピュータで構成される。正常時はＥＬＡＣはエレベータ、スタビライザ、およびエルロンの操舵を、ＳＥＣはスポイラ操舵を、ＦＡＣはラダー操舵を受け持つ（図３―４）。

ＥＬＡＣの二重系が

全部故障したら、エレベータとスタビライザの操舵はSEC三重系が引き継ぐ。SEC三重系が全部故障したらスポイラは操舵できなくなるが、ELACでエルロンが操舵できるので、ロール制御は可能である。このように、ラダーを除けば、一系統だけの故障では操縦の機能は失なわれないことを「冗長性を備える」と言う。電源と信号経路も分離され、個々の舵面は別個の油圧系統によって駆動される。

さらに、コンピュータはトムソン社とSFENA社、マイクロプロセッサはモトローラ六八〇〇〇とインテル八〇一八六というように、別の会社で作ったものが使われ、ソフトウエアの製作の分散も図られている（これを異種冗長性という）。

さて、このように多重化と冗長性によってリスクの分散が図られたシステムが全く機能を失う場合は、電源が全部故障して七つのコンピュータが全部止まってしまったときくらいで、これは滅多に起きそうもない。そのときでもラム・エアタービン（一種の風車）が空中に突き出されてその回転力で発電機が回り電力を供給する。電圧が立ち上がるまでが五秒、そのあとコンピュータが働き始めるまでの何秒かは、パイロットが機械式バックアップを使って手動で機体の姿勢を維持することができる。

A320ではこの機械式バックアップがラダーとスタビライザにあり、これで機体の方向とピッチ姿勢のコントロールはできる。ロール・コントロールに機械式バックアップがないのは、エ

アバスの特徴である。緊急時にはロールは次のような変則的な方法でコントロールできる。ラダーを使って機首方位を変えて下がった翼のほうに横滑りを起こすと、上反角効果によって下がった翼が上がる。つまり、ラダーによって間接的な方法でロールをコントロールするのである。そのとき方向のコントロールはできないから、ただ空中に浮かんでいるだけである。しかし、それも電力が復活するのを待つ数秒ないし十数秒間だけのことであると考えられる。結局、A320では、一時はパイロットがコントロールを引き継いでも、最後は機械がまたそれを引き受ける。

エアバス以外のメーカが作った航空機、例えばB777でも、多重系コンピュータを備え、エアタービンが装備されていて、極限状態では多重系コンピュータの高い信頼性に頼っているのは同じである。ただし、そのような事態に至る前のパイロットの役割についての考え方には差がある。一方の考え方は人間の不用意な入力が事故の要因であるとして、それを排除するために機械に大きな権限を持たせるものである。他の考え方は、パイロットの判断を優先させ、その能力を発揮する余地を残した設計である。


従来の「最後の砦」の考え方からすれば、後者をとらなければならないであろう。しかし、操縦自動化が進むなかで、人々の意識も変わってきた。旧世代機もA320も操縦した経験がある南アフリカのプーラーという機長はある航空雑誌に投稿して、「手動で飛行する時間が少なくな

った現代機では、自動飛行システムを正しく有効に管理することは、手動で飛行するより重要な仕事である。困難な状況のなか手動で飛ぶことによって、自分に不利な手を積み重ねるのか？飛行は自動飛行システムに任せて、パイロットは頭をすっきりさせよ」という主旨のことを述べている。

実際、パイロットが「航空安全の最後の砦」を果たすには、技術が複雑になり過ぎた。この現実が、プーラー機長が言うように「パイロットの役目は危機的状況に陥る前にその兆候を察知し、標準的な手段を講じることによって、事故につながる連鎖を未然に絶ち切ることにある」という考えが生まれる背景にある。このように、従来型の操縦技量よりも知能的なシステム管理を重視する考えが、徐々にパイロットの間に生まれている。

「パイロットは航空安全の最後の砦」であるということを理念として堅持するとしても、機械が適している機能については機械が最後の歯止めになる機能を組み込んだ設計を認めるという、柔軟な思考態度が必要になる。

第四章　自動化はいかにあるべきか



エアバスＡ３２０やボーイングＢ７４７—４００などの、フライ・バイ・ワイア方式のジェット旅客機が運航を始めてから一〇年余りが過ぎた。さらに高度なコンピュータ技術を採用したＡ３４０やＢ７７７も、二、三年前から運航し始めた。いまでは、われわれは航空機の自動化の問題点について、かなりはっきりした認識を持つようになり、次世代のより成熟した自動化技術を生み出すための経験が蓄積され、その経験を次の開発に活かそうとする努力も開始された。

この将来へ向けての「自動化はいかにあるべきか」の問題に答えることは、専門書に譲るべき問題かもしれないが、本書でもこれに全く触れないわけにはいくまい。

そこで、この章では将来の自動化について、著者なりの展望を手短に述べてみたい。

「技術中心の自動化」の誤り

これまでの自動化で反省すべき点はなにか。

人間と機械が結合した複合システムでは、技術が成熟しないうちに実用化を急ぐと、自動化から取り残された部分や自動化するにはコストがかかるものを人間に回すという、いわゆる「技術のための自動化」にならざるを得ない。その例は、自動化されたシステムで計器のモニターとかキーボード操作とか、本来、人間の特性に合わない仕事をパイロットに割り当てたことである。反対に、総観的判断とかファジーな情報の処理とかいった人間能力の優れた部分は、放置されて

空回りするばかりである。その結果、機械と人間がそれぞれの長所を発揮して補完し合うのではなく、欠点同士で結び付くことになる。これでは「機械―人間共同意志決定系が、個人の能力から期待されるパフォーマンスに比べて、最適以下のパフォーマンスを示している」という、換言すれば、人間の能力は機械と組み合わせたとき最大には発揮されないという批判がでるのも、無理からぬことである。

航空機の自動化の問題点は、これまで述べてきたように、航法の自動化にある。リンドバーグの大西洋横断飛行の例を挙げるまでもなく、どこをどう飛ぶかを決定することはパイロットの仕事で、そこで人間的な能力が最も華々しく発揮されてきた。この仕事を機械化したとき機械と人間とが相争う事態が起こって、新しい不安定要因が航空輸送に持ち込まれた。

そのため、従来の慣行からきっぱりと別れ、決められた新しい手順に従うことがパイロットに厳しく求められた。自動化は人間に思考と行動のパターンの変更を迫っているのである。「ヒューマンファクターズは航空安全の最後のフロンティア」といわれるようになった背景が、これである。

しかし、このように問題の解決を人間の順応性だけに強く依存することに問題はないだろうか。それは、前述したように、ますます個性化し、自己中心的になり、規律を嫌うようになった現代の若者の傾向から見て、希望が持てる解決策とはなり得ないのではないか。

このような難しい道を採らざるを得なくなった第一の原因は、「技術中心の自動化」にある。この自動化の誤りは、要約すると次の諸点である。

（1）コントロールの本拠は機械にある

（2）機械は完全に自立できるとしている

（3）人間が自動化されたシステムのなかで果たすべき新しい役割を理解し、支援しようとしない

（4）設計者の過信または偏見。これは人間—機械系の安全性を脆弱（ぜいじゃく）なものにしている

スーザンさんの犬

コックピット自動化に関する一九八八年の「コックピット・オートメーション——期待と現実」ワークショップで、座長である米国のNASAのエームス研究センターのスーザン・ノーマン博士は、将来の輸送機のコックピットのなかの情景を次のようにユーモアたっぷりに表現した。

「乗っているのは一人のパイロットと一匹の犬である。パイロットの仕事は犬に餌をやることである。犬はパイロットが何かに触ろうとすると咬みつくためにそこにいる」（図4—1）この犬は自動化の化身なのである。

この女性科学者が暗に示唆しているのは、次の二点であると考えられる。一つは、将来の究極の航空機では、人間は何も操作する必要がなくなることである。もう一つは「人間が機械を監視するのではなく、機械が人間を監視する」ということである。この考えは重要な発想である。パイロットは「安全の最後の砦」で、機械の動きをモニタし、それが故障すればコントロールを引き継ぐというのが、これまでの考え方であった。

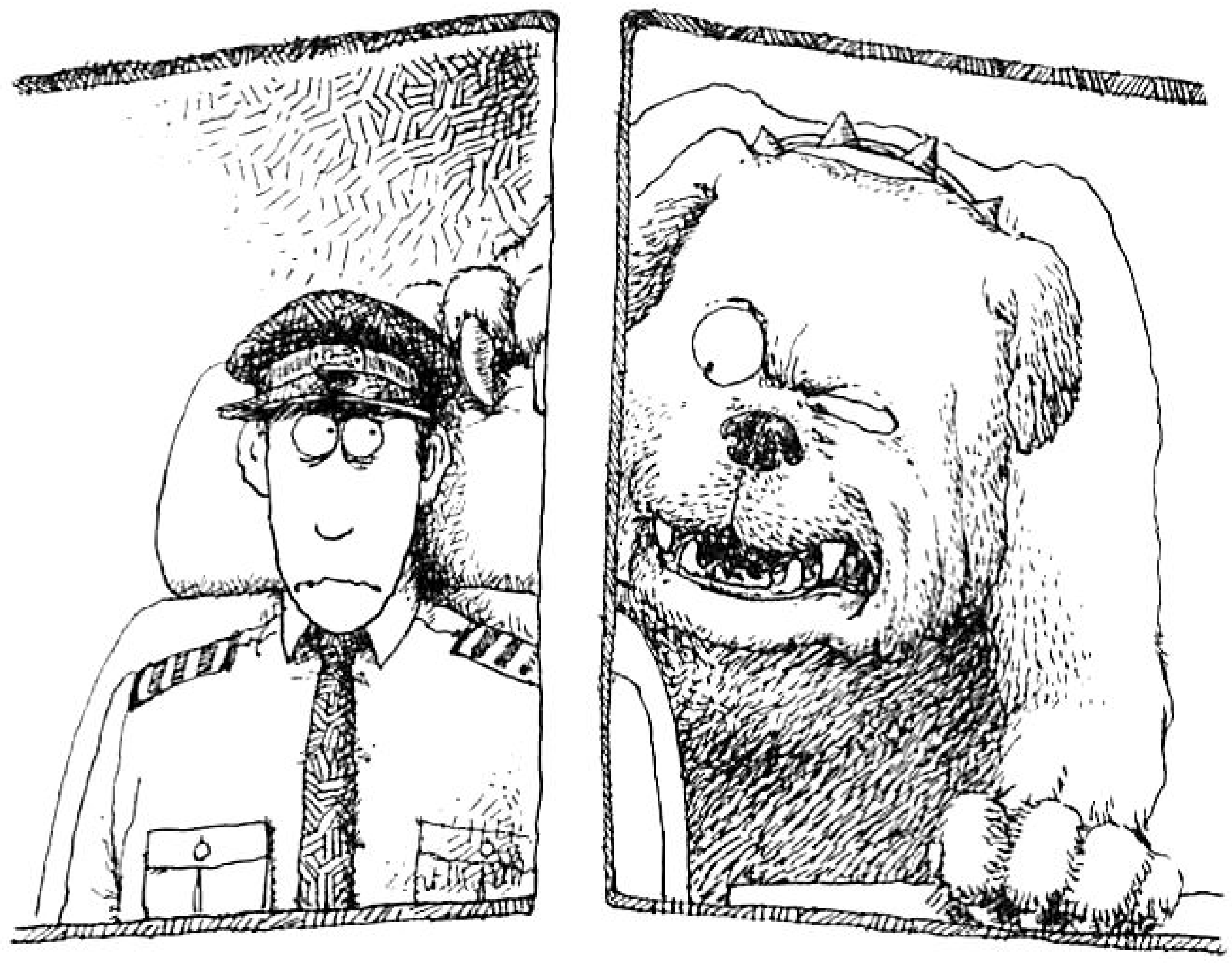


図 4-1　スーザンさんの犬

しかし、本来、人間は単調なモニタの仕事には向いていない。ましてや、自動化された航空機ではシステムが複雑なため、パイロットがその動きをモニタするということは、実際的ではなくなった。それとは逆に、機械をモニタに適するように知能化し、まずパイロットが主体的に判断し行動したあと機械がモニタし、必要ならパイロットをバックアップするというのがむしろ現実的ではないのか。

スーザン女史が示唆しているように、将来は自動化によってパイロットの作業量は減るであろう。そのことが、巡航などの長時間飛行ではパイロットを退屈させ、

警戒心を失わせる。このコックピット内での退屈の防止策として、スーザンさんの犬とは全く逆のことをさせようとする試みもある。この犬の名は「パイロット警備システム（PGS）」といい、パイロットが何もしないと咬みつく。これはエアバス社が欧米の研究機関と協力して開発し、現存運用評価試験を行っている。このシステムはコックピットのなかで長時間乗務すると、退屈して警戒心を失いがちなパイロットの活動状態をモニタする。そしてパイロットが一定時間何もしないでいると、フラッシュか音声で警告する。それによって、パイロットの気の緩みや居眠りを防止しようとするのである。

このスーザンさんの犬とパイロット警備システムの考え方は、ある点で共通する。それはいま述べた「機械が人間を監視する」という考えである。新しいコックピットでは人間が操縦し、機械がモニタしバックアップする。操縦の主役は人間なのである。そのとき自動化は、ボーイング社のコックピット設計担当のB・D・ケリー部長がいうように「コックピット・オートメーションと呼ぶのは誤りで、パイロット支援（Aids to Pilot）と呼ぶべきもの」になるであろう。

この種の自動化には人間と機械の円滑なコミュニケーションが必要で、機械に人工知能を賦与するという困難な仕事がある。そのためには設計者側の努力だけでは不足で、人間工学の知識やパイロットが運航現場で得た経験をできるだけ多くフィードバックすることが不可欠である。そのとき、ボーイング社がB777の開発の設計段階からエアラインの要求を取り込もうとして構

築したような協力の枠組み（いわゆるWorking Together）が有効に働くであろう。

コントロールの本拠は人間

米国の航空界、とくに大学や研究機関の間では、航空機の自動化は人間中心であるべきことが、強く主張されている。前述の一九八八年のNASAのワークショップでは、それまでの自動化のもたらした実状を踏まえ、その反省のうえに「人間中心の自動化」が提唱された。その要点は次の通りである。

（1）コントロールの本拠は人間にある

パイロットはタスク責任のある領域で、有効なオーソリティを持たねばならぬ。人間が機械資源をコントロールする。すなわち、低レベルの機械エージェントを指令する道を残して、行動の自由度をコントロールできる。しかし、機械は常に人間を支援すべきで、人間が完全に自力でタスクを遂行するか、逆に完全に機械に任せるかの判断を強いられる事態は避ける。

（2）管理者としての人間は、低レベルの機械エージェントをモニターする

また、高レベルの状況評価も行い、機械の作動状況全般をフォローする。すなわち、機械がいま何をしているか、なぜそうしているかを、常に把握している。

（3）エラー検出と回復のための支援をする
パイロットは機械に示唆された診断を行う。人工知能がプロテクション・チェックと判定を行い、また、パイロットの状況認識を助ける。例えば、この自動化システムは複雑な表示を簡略化し、中央の画面に統合表示する。警報システムは重要な情報のみを表示し、その情報と操作の関連を明確にした支援システムとする。また、パイロットのパフォーマンスをモニターし、パイロットが問題を分析し代替手段の可否を評価し実行するときは、大規模なデータベースによってその補佐役を勤めるのである。そのためには、自動化システムは人間の意図を推論し、その行動をフォローできる知的なシステムでなければならない。

（4）タスクを最適配分する
安全が比較的問題にならない飛行段階ではワークロードを増やし、多忙で事故が起こりやすい飛行段階でワークロードを減らす、といったワークロード管理も重要である。とくに、外界監視が必要なときにヘッドダウン・タイム（キーボード操作で下を向いている時間）を減らし、パイロットの状況認識力が低下するのを防がなければならない。そのため、ソフトウエアを追加することによってプログラムの変更を容易にしたり、キーボードを使ったデータエントリをなくすことを検討する。

（5）パイロットの介入を可能にする

介入が必要な状況はなにかを分析し、適時介入可能なようにインターフェースを設計することが自動化活用のための設計の基本になる。ただし、クルーは何でも思いどおりに選択することを許されるわけではない。システムに応じて特定の自動機能を使用するためのルールや環境を指示する、特別な操作手順を定めなければならない。

この自動化の設計方針で、とくに項目（1）の「コントロールの本拠は人間にある（Human Locus of Control）」という表現は、「人間中心の自動化（Human-centered Automation）」というのに比べて、オーソリティの在りかを明確にした点で、より適切である。

この人間中心の自動化の考え方は、いまでは世界の航空界の各分野で支持されている。前章で英国航空局のニューマン機長の「人間的エラーを起こす恐れのあるシステムの設計には、それがいかなるシステムであっても、エラーをしてもそれを救う安全のための基準を設ける必要がある」という意見を紹介した。このような考え方を受け入れるなら、航空技術の役割は人間能力の負の側面を補強するために、さらに進んでは、人間能力のすぐれた側面を発揮させるために、人間を援助することである。

現在、このような方向性は研究レベルでは打ち出されているが、具体的にどこに設計上の問題があるかは、まだ十分に見究められていない。また、安全性、経済性、定時性、快適性などの互いに相克する要求を調和させるときに、メーカの間で考え方に違いが出ることが考えられる。

しかし、現世代の自動化された航空機を運航する現場から設計へのフィードバックが日常的に行われれば、設計コンセプトの淘汰が起こり、その結果生き残った技術が次世代の航空技術の基盤になることが期待される。そのためには、いま米国の主導で進められている世界的な航空情報ネットワーク（GASN：Global Air Safety Network）などの、秘匿性が保証され、パイロットの自発性にもとづくインシデント（事故寸前の異常運航）報告制度が有効に働くであろう。このように次世代技術創造の仕事は設計者、パイロット、および運航に関係する多くの人々の共同作業によらなければ達成することはできない。前述の「Working Together」の実践がここでは必須の条件になる。

おわりに

事故は起きないにこしたことはないが、絶対に落ちない航空機はなく、落とさない努力があるだけである。鳥のように天気が悪いときは巣に籠って飛ばなければ事故は起こらないが、定期航空としてはそれでは安易に過ぎる。与えられた社会的使命を果たそうとするとき、飛行ルート上に待ちかまえるもろもろの危険と、それを防止しようとする努力のせめぎ合いのなかに、事故が起こる。航空安全は行動的な安全なのである。

公共交通にとって安全の確保が最大の使命であることは言うまでもないが、しかしこの安全性には絶対的基準があるわけではなく、社会情勢によって、また輸送業の形態によって変わる。例えば自動車事故では、わが国だけでも年間一万人近い死亡者が発生しているが、世間はそれほど問題にしない。航空機事故による死亡者数は、世界全体でさえその一〇分の一以下の、一〇〇〇人前後なのに、これが問題になる。このように、安全性は数字だけの問題ではない。

では航空ではなにが安全性の基準なのだろうか。それを知るためには、安全性の要求がどこから来ているかを見ればよい。

航空安全が大きな社会問題になっているのは、まず米国である。このところ続いた航空機事故

が社会に衝撃を与え、それが契機となってホワイトハウスにゴア副大統領を長とする航空安全保安委員会が設置されて航空安全の長期計画が検討され、一九九七年のはじめに報告書が出された。そのなかで、航空安全については、二〇一〇年までに事故率をいまの五分の一に減らすべきであるという勧告が盛られた。この計画の実行可能性を巡って、いま米国内で議論が戦わされている。米国では、なぜ航空安全がこれほど問題になるのだろうか。

米国は機会（チャンス）を求めて集まった、雑多な文化をもつ多民族が作る競争社会である。成功した経営者が巨額の富を得て賞賛される一方で、企業活動のモラルを監視する市民の目は厳しい。製造者責任の追及、情報公開の要求、消費者運動が激しく、世界に類を見ない訴訟社会でもある。定期航空輸送はこのような状況のなかで営まれる公共的な企業活動であって、個人が自己責任で行う車の運転とは基本的に性格が違う。製造者責任を追及されて潰れた小型機メーカもある。パンアメリカンのような大手のエアラインも、規制緩和の波をかぶって倒産する。

規制緩和というけれども、政府による安全規制は依然として残っている。それどころか、新規に参入したエアラインの安全監督の強化と、その安全情報の公開を政府に求める民衆の要求は強い。このように、航空安全について航空業界は市民から説明責任が求められている。それにこたえて議会が動き、政府機関に対して監督の強化を求めている。一方、司法は公権力の行使より、むしろ人権の擁護に役立っていることは、米国社会の際立った特徴である。航空分野において

も、事故の遺族が起こした裁判で、法廷が弁護団の要求を認めて、エアラインの内部情報の公開を命じる裁定を下すといった国情である。米国では規制は官の論理ではなく、市民の論理に基づいている。

このように市民の航空輸送に対する関心が強いため、航空安全が政治の場でしばしば問題になる。だから政府も手抜かりは許されず、またエアラインと航空機メーカは事故責任の追及に対する備えをおろそかにできない。結局、市民活動が米国の社会に厚みのある安全文化を生み出しているのであって、政府による安全規制だけではこうはいかない。

次に、産業の面からみると、米国には軍事航空で培った高度な航空宇宙技術があり、その基盤のうえに圧倒的な航空機製造能力を誇っている。冷戦後では軍用機よりはむしろ民間航空機が重要な輸出商品であるからである。国土が広くて民度が高い米国は、それ一国でも世界有数の航空旅客輸送市場である。このようなことから、世界の航空機の耐空性基準は、実質的には米国の航空規制当局とメーカが決める。

また、米国には国外からの旅客機の乗り入れが多いから、国内法によって外国籍の航空機の乗り入れを規制することによって、世界の航空業に介入することができる。一九九五年から米国の連邦航空局（ＦＡＡ）が、各国政府の自国の航空会社に対する安全監督能力を監査して、資格を欠く国の航空会社の米国への乗り入れを禁止したり制限したりしたことは、各国の航空界に衝撃

法にによらずに国内法を適用して外国の航空産業に制約を加えることである。法的な問題は別としても、人材も資金もない国々はこの世界最大の市場に参入できなくなる。二つは、この企ては個々のエアラインの安全能力ではなく、登録国の政府の規制能力を監査することである。米国は他の産業分野では政府による規制撤廃を各国に迫りながら、航空分野では逆に、政府による規制強化を求めている。

このような米国の施策は、いわば米国主導による世界的な航空安全保障体制を構築しようとするもので、軍事的安全保障体制の航空版とも言えなくはない。米国は軍事面で「世界の警察官」であるが、航空交通の分野でもその役目を担おうとしているのである。

しかし、いかに米国の航空政策の政治的意味合いを分析し批判してみても、基本的には米国の主張の正当性を認めざるを得ないであろう。実際、規制緩和を強力に押し進める一方、それに伴って起こる運航品質の低下を防止する努力も怠ることができないという米国社会の仕組みは、基本において健全であり、このことが米国の主張の正当性を保証している。航空安全が政治や社会の問題として議論もされない国が、活発な世論を背景に展開する米国の世界戦略に対抗できるはずはない。

しかし、政治だけで安全問題を解決することはできない。技術の問題は技術で解決しなければ

ならない。だが、航空技術の前には、いま、最後の技術のフロンティアともいえる「人間の壁」が立ちはだかっている。この壁を克服するためには、コックピットのなかに統合されるべき二つの要素、すなわち人間と機械の間の調和を図らずに高度化しても、所詮は失敗に終わるだろう。この統合にはヒューマンコントロール（人間の心に対する働きかけ）が必要であるが、このヒューマンコントロールこそは古来の難問である。航空技術も行きつくところまで来てしまった感がある。

著者は前著『飛行機はなぜ落ちるか』で、航空安全に対する脅威となっている自然条件、技術、そして人間と機械系の関わりについても論じた。この最後の、人間−機械系の問題は、前著では深く考察する余裕がなかったが、最近になって、この問題に対して世間の関心が高まっているようである。このような学際的問題には専門家はいないと著者は考えているが、かといってこのような物事の全体像を捉える問題は洞察力に秀でたノンフィクション作家の領域だとする意見にも同意できない。同様に航空技術に携わる者は、狭い専門領域の紹介に専念しているだけでよいのだろうか。航空が社会とこのように深い関わりを持つに至った今日では、それは航空技術者の怠慢ではなかろうか。この反省は著者が本書を書く動機になった。

もともと一研究者に過ぎない著者には、この多岐にわたる知識は明らかに不足していた。しかし、その後、著者は日本エアシステムの乗員教育訓練センターで数年を過ごし、この間に航空輸

送の現場で働くパイロットやその他の人々と日常接することによって、現場で起こる事象を多く見聞きすることができた。この経験は、航空安全の問題を、著者が以前に携わっていた機体の研究開発だけでなく、航空輸送の実践の立場からも考察する助けになった。もし、これらの人々との出会いがなかったら、本書は書かれなかったであろう。

著者がこの貴重な経験を持つことができたのは、同社の大島士郎、粂喜久治、上松康祐（現ハーレクイン航空社長）の各取締役、その他多くの方々のご援助によるものである。また、講談社科学図書出版部の梓沢修氏には、執筆に当って有益な示唆をいただいた。記して感謝の言葉に代えたい。

一九九八年五月

著者

引用文献リスト（続き）

(6)木下　恂；『ソフトウエアの法則』、中公文庫、1995
(7)ミシェル・アスリーヌ（花上克己訳）；『エアバスA 320は、なぜ墜ちたか』、講談社、1995
(8)吉永良正；『「複雑系」とは何か』、講談社現代新書、1996
(9)Chuck Yeager & Leo Janos ; "Yeager", Bantam Books, 1985
(10)J.H.Doolittle ; "I Could Never Be So Lucky Again", Bantam Books, 1991
(11)E.H.J.Pallette, & S.Coyle ; "Automatic Flight Control", Backwell Science Publishers, 1993
(12)E.Tenner ; "Why Things Bite Back-Technology and the Revenge of Unintended Consequences", Alfred A.Knoof, Inc., 1996

第三章

(13)W・ハイゼンベルグ（山崎和夫訳）；『現代物理学の思想』、みすず書房、1956
(14)E・ローゼンフィールド（菅原勇、平田明隆訳）；『記憶とは何か』、講談社ブルーバックス、1993
(15)神川喜代男；『脳をつくりあげた生物の不思議』、講談社ブルーバックス、1995
(16)ジョージ・ジョンソン（鈴木晶訳）；『記憶のメカニズム』、河出書房新社、1995
(17)西垣　通；『ペシミスティック・サイボーグ』、青土社、1994
(18)西垣　通；『思考機械』、ちくま学芸文庫、1995
(19)岩谷　宏；『ラジカルなコンピュータ／思想のための最終機械』、ジャストシステム、1995
(20)岩谷　宏；『パソコンを疑う』、講談社現代新書、1997
(21)ロジャー・ペンローズ（林一訳）；『皇帝の新しい心——コンピュータ・心・物理法則』、1994
(22)J・デイヴィッド・ボルター（土屋俊、山口人生訳）；『チューリング・マン』、みすず書房、1995

盲目飛行パネル 31
モード 129
モード・リバージョン 116,149
目視飛行方式 94

〈や行〉

揚力補償 60
ヨー 52
ヨーダンパ 39,52
横滑り 52
横ナビゲーション 39
横方向加速時計 52
余剰パワー 83

〈ら行〉

ラダー 22
ラダー・レシオ 124
ラム・エアタービン 230
ランディング・ミニマ 42
リーズ・ブラッドフォード空港 27
離陸決定速度 182
リング・レーザー・ジャイロ 65
ルフトハンザ航空 67,170
レートジャイロ 52
レグ 106
レベルチェンジ・モード 116,150
リンドバーグ 28
ローカライザ 34
ローカライザ・ポインタ 34
ロール 37,52
ロソVOR 100
ロメオ・ポイント 96,102

〈わ行〉

ワークロード 70
ワルシャワ空港 170

引用文献リスト

はじめに

(1)Boeing Commercial Airplane Group ; "Statistical Summary of Commercial Jet Aircraft Accidents", Worldwide Operations 1959-1995

(2)Airbus Industrie ; "Hanger Flying", June 1997

(3)McDonnell Douglas ; "Commercial Jet Transport Aircraft Accident Statistics", 1995

第一章

(3)チャック・イエーガー（関口幸男訳）；『イエーガー――音の壁を破った男』、サンケイ出版、1986

(4)坂井三郎；『続・大空のサムライ』、光人社、1993

(5)鎌田　慧；『大空港25時』、草思社、1996

中華航空 159
直感的スイッチ 119,156
低エネルギ状態 182
ディドロ 22
テークオーバ押しボタン 151
デクラブ 47
デジタル・フライトデータ・レコーダ 108
デテント 59,166
デフォルト・モード 167
デローテーション・モード 136
電波高度計 41,111
動圧 121
ドーリットル 28
トリム状態 55

〈な行〉

内耳前庭器官 25
ナイト航空 27
内部パラメータ 57
内部ループ 57
名古屋空港 159
ナビゲーション 64,194
人間/機械のインターフェース 73
人間の壁 14
熱の壁 14

〈は行〉

バーチャルリアリティ 191
パイロット・イン・フライト 176
パイロットが誘起する振動 179
パイロット警備システム 238
パイロット支援 238
バグ 221
バンガロール空港 145
バンク角 37
ヒースロー空港 44
飛行安全財団 35,224
飛行制御システム 180
飛行包囲線 80
非精密進入 35
ピッチ 37,52
ピッチ角 80
ピッチ姿勢維持モード 84
ピッチ・プロテクション 177
ピッチレート 75
必要パワー 83
ピトー管 59
ピトー・静圧管 121
ヒューマンファクターズ 14,70,183
標準大気 126
ビルゲン航空 121
貧アフォーダンス環境 204
フィード・フォワード制御 60
フェライニグング・コックピット 210
プエルトプラタ空港 122
フォッカー 66
ブカレスト空港 118
プッシュボタン・テクノロジ 72
フライトディレクタ 37
フライ・バイ・ワイア 49
プライマリ・フライトディレクタ 148
フラップ展開最大速度 115
フランス航空 67
ブリタニア航空 136
ブリティッシュ・エアクラフト 67
フレア 64
フレア・モード 84,114
プログラミング・エラー 134
米国定期航空パイロット協会 198
ベーシック・スキル 209
ヘッドダウン・タイム 240
ヘルシンキ空港 157
ホーミング・レンジ 30
ホールドモード 134
ボゴタ空港 102
ホワイト・アウト 95
本能的スイッチ 156

〈ま行〉

マーカービーコン 30
マッハトリム 39,55
マヌーバ 45,113
マンチェスター空港 136
無線標識施設 65
メッサシュミット・ベルコウ・ブロム 66
メンタル・モデル 136
メンタル・ワークロード 71

109
コックピット・リソース・マネージメント 186
固定翼機 22
コマンドバー 139
コントロール・ホイール 73
コンパス 59
コンピュータ・リテラシ 190

〈さ行〉

差圧 121
サーボ・アクチュエータ 60
最小選択可能速度 150
最小操縦速度 113
最低運航条件 42
サイドスティック 72
サイレント・コックピット 205
坂井三郎 24
山岳波 182
シエラ DME 96
指向性誘導電波 34
システムエンジニア 129
姿勢指示インジケータ 37,139
姿勢指示計 125
失速迎角 78
失速速度 47
失速プロテクション 208
自動運航 63
自動推力制御 39
自動操縦 63
自動操縦の階層 51
自動着陸 43
自動的ゴーアラウンド 82
自動トリム 52
死亡事故率 12
地面効果 84
地面接近警報装置 95
地面のなかへの制御された飛行 35
ジャイロ 59
上級操縦パッケージ 182
冗長性 230
正面向き型コックピット 68
人工水平線 29
人工水平線インジケータ 28
垂直速度 116
垂直プロフィル 64
水平状況インジケータ 37
スキーマ 140
スタビライザ 55
スタビライザトリム 158,174
スティックシェーカ 124
ステップダウン進入 35
ストラスブール空港 141
スピードトリム 55
スピード・プロテクション 80
スピン 26
スポイラ 57,102,170
スラスト・リバーサ 170
静圧 122
制御ループ 57
精密進入 34
世界航空情報ネットワーク 183
石油危機 24
全圧 121
旋回コーディネイション 60
全損事故 6
全損事故率 6
全損事故率の年次変化 6
セントルイス魂号 28
操縦索 49
操縦性増大システム 57
操縦舵輪 73
操縦の権限 61
操縦面 22
速度介入モード 83
速度プロテクション 115
外滑り 61
ソフトウエア VIA 2000 221
ソフトなプロテクション 84

〈た行〉

対気速度 115,121
タイ航空 153
タイ国際航空 96
第三世代 6
第二世代 13
ダイバート 43
第四世代 6
タックアンダ 57
ダッチロール 52,179
縦ナビゲーション 39
舵面 22
ダランベール 22
タロム航空 116
着陸モード 159

アルファ・フロア 82,148,213
アルファ・プロテクション 80
アルファ・ベーン 124
アンセット・オーストラリア航空 153
安全離陸速度 139
安定性増大システム 52
暗黙知 207
イースターン航空 67
イエーガー 24
異種冗長性 230
ウインドシア 42
ウェイポイント 66
ウェザー・ミニマ 40
内滑り 61
運航プロシジュア 99
エアバスインダストリ 66
エアロスパシアル 66
エージェント 40
エール・アンテール航空 173
エネルギ・モード・フェール 139
エルロン 22,61
エルロン逆効き 163
エレクトリック・トリム 116,158
エレバス山 94
エレベータ 22
王立航空学会 186
オークランド空港 93
オーソリティ 61,115,154
オートスロットル 39
オートスロットル・モード 118,134
オートパイロット 39,63
オートフライト 63,66
オーバーライド 156
音の壁 14

〈か行〉

階層化 132
外部パラメータ 57
外部ループ 57
角速度 75
荷重倍数 75
滑走路視距離 41
滑走路侵入 154
カテゴリⅠ 42
カテゴリⅡ 42
カテゴリⅢa 42
カテゴリⅢb 42
カテゴリⅢc 42
カトマンズ空港 96
カリ空港 99
慣性基準システム 65,223
慣性航法システム 65
慣性能率 77
完全失速 182
カンパニー・ミニマ 43
気圧高度 126
気圧高度計 59,112
危険率 5
基準速度 47
規制緩和 24
距離計測装置 37
きりもみ運動 26
キングスフォード・スミス空港 152
空間識失調 26
グライドスロープ 34
グライドスロープ・ポインタ 34
グラスコックピット 39,73
クロスオーバ速度 77
迎角 78,113
計器飛行 31
決心高 41
降下経路角 86
高カテゴリ着陸 42
降下率 47
航空安全報告制度 133
航空機—パイロット結合 179
航空情報ネットワーク 242
高度維持モード 159
広胴型 67
高度獲得モード 138,175
航法 194
航法計器 59
ゴーアラウンド 66,172
ゴーアラウンド・モード 159
ゴーレバー 159
国際エアライン・パイロット連合 70
国際民間航空機関 41
国家運輸安全委員会 36
国家研究審議会 179
コックピット・ボイスレコーダ

索引

〈アルファベット〉

AAMP 182
ADI 37,139
ALPA 198
ALT ACQ(モード) 175
ALT HOLD(モード) 159
ALT スター(モード) 146
ALT (モード) 129
AMP 182
APC 169,179
ASRS 133
CAS 57
CASA 67
CFIT 35
CLIMB-OPEN CLIMB (モード) 147
CRM 186
CRT 73
CVR 109
C スター U 制御 78
C スター制御 74
DF 98
DFDR 108
DME 37
ECAM 196
EICAS 123
ELAC 229
FAA 104
FAC 229
FCS 180
FFC 68
FLEX 173
FSF 35,224
GASN 183,242
GPWS 95
HDG(モード) 129
HGD V/S(モード) 142
HOLD(モード) 134
HSI 37
ICAO 41
IDLE-OPEN DESCENT (モード) 145
IFALPA 155
ILS 32
ILS インジケータ 34
INS 65
IRS 65,223
LAND(モード) 159
LAT NAV(モード) 129
LOC(モード) 129
LOFT 216
LVL/CHG(モード) 116,150
MLS 45
NASA 133
NRC 179
PATH(モード) 129
PCMS 221
PFD 148
PGS 238
PIO 52,169,179
SAS 52
SEC 229
SPEED-VERTICAL SPEED (モード) 149
SRS 172
TRK FPA(モード) 141
V_1 182
V_2 139
V_c 77
V_{FE} 115
V_{LS} 145,150
V_{MC} 113,175
V_{REF} 47
VS(V/S) (モード) 83,129,147
V_S 47
α_{prot} 80

〈あ行〉

アーキテクチャ 136
アイドル 118
アクチュエータ 39
アドバーンス・ヨー 61
アフォーダンス 201
アプセム空港 108
アメリカン・イーグル航空 162
アメリカン航空 99
アラスナシオナレス航空 121
アリアン5型 222
アリストテレス 22

N.D.C.687　254p　18cm

ブルーバックス　B-1214

ハイテク機はなぜ落ちるか
コンピュータ化が引き起こす新たな航空機事故

1998年5月20日　第1刷発行

著者　遠藤　浩
発行者　野間佐和子
発行所　株式会社講談社
〒112-8001東京都文京区音羽2-12-21
電話　出版部　03-5395-3524
販売部　03-5395-3626
製作部　03-5395-3615
印刷所　(本文印刷)豊国印刷株式会社
(カバー表紙印刷)双美印刷株式会社
製本所　有限会社中澤製本所

定価はカバーに表示してあります。

ISBN4-06-257214-1(科)

発刊のことば

科学をあなたのポケットに

二十世紀最大の特色は、それが科学時代であるということです。科学は日に日に進歩を続け、止まるところを知りません。ひと昔前の夢物語もどんどん現実化しており、今やわれわれの生活のすべてが、科学によってゆり動かされているといっても過言ではないでしょう。

そのような背景を考えれば、学者や学生はもちろん、産業人も、セールスマンも、ジャーナリストも、家庭の主婦も、みんなが科学を知らなければ、時代の流れに逆らうことになるでしょう。

ブルーバックス発刊の意義と必然性はそこにあります。このシリーズは、読む人に科学的に物を考える習慣と、科学的に物を見る目を養っていただくことを最大の目標にしています。そのためには、単に原理や法則の解説に終始するのではなくて、政治や経済など、社会科学や人文科学にも関連させて、広い視野から問題を追究していきます。科学はむずかしいという先入観を改める表現と構成、それも類書にないブルーバックスの特色であると信じます。

さらに理解を深めるために次のようなブルーバックスがあります。

『大事故の予兆をさぐる』(宮城雅子・B1209) 事故へ至る道筋を考察する。

『飛行機はなぜ落ちるか』(遠藤浩・B1019) 一般的な航空機事故の原因を考える。

『飛行機はどう進化するか』(近藤次郎・B1133) 技術の発達史から事故の経緯まで広く見渡す。

『図解・ハイテク飛行機』(柳生一・B1121) 航空機の構造を詳しくやさしく解説する。

『紙ヒコーキで知る飛行の原理』(小林昭夫・B733) 紙ヒコーキを飛ばしながら飛行の仕組が理解できる。

●Bの数字はブルーバックスの刊行順番号です。

9784062572149

1920253009003

ISBN4-06-257214-1

C0253 ¥900E (0)

定価:本体900円
※消費税が別に加算されます。

安全の切り札・コンピュータが
新しい事故を引き起こす!

空の安全の切り札として、
現代最高のコンピュータ・システムを導入したハイテク機。
しかし、事故は減少するどころか、
今までにない新しいタイプの事故が続発した。

コンピュータ/人間システムの不備を指摘し、
コンピュータ万能主義に警鐘を鳴らす!

